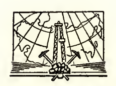
Контроль и автоматизация процессов переработки нефти и газа



В. Р. АНДЕРС

КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ГАЗА

«Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов нефтяных вузов и факультетов»



ИЗДАТЕЛЬСТВО «Н Е Д Р А»
Москва 1964

14—5—2
УДК 665.5 : 65.01.56

АННОТАЦИЯ

В книге описаны основные контрольно-измерительные приборы и автоматические регуляторы, применяемые в процессах нефтепереработки и газовых производствах. Приведены элементы теории автоматического регулирования. Рассмотрены вопросы выбора и применения приборов и регуляторов для контроля и автоматизации технологических процессов.

Книга является учебным пособием для студентов нефтяных вузов по специальности технология нефти и газа и может быть полезна для широкого круга специалистов, работающих на нефтеперерабатывающих, нефтехимических заводах и газовых производствах.

Рецензенты:

1. Кафедра автоматики и телемеханики Московского института нефтехимической и газовой промышленности.
2. Кафедра автоматизации производственных процессов Грозненского нефтяного института.
3. Смирнов П. Ф. — начальник цеха КИП и автоматики завода Нефтегаз.

ОТ АВТОРА

Настоящая книга является учебным пособием для студентов нефтяных вузов по специальности технология нефти и газа и составлена по программе курса «Контрольно-измерительные приборы и автоматические регуляторы процессов нефтепереработки и газовых производств».

Книга знакомит студентов с принципами действия и схемами современных измерительных приборов теплового контроля, приборов контроля состава и качества нефтепродуктов и автоматических регуляторов, с элементами линейной теории автоматического регулирования, с вопросами выбора и применения приборов и регуляторов, а также с построением схем контроля и автоматизации промышленных объектов по переработке нефти и газа.

Книга предназначена не для подготовки специалистов по контролю и автоматике. Учитывая, что она охватывает широкий круг вопросов, материал всех глав изложен по возможности кратко, но в объеме, достаточном для того, чтобы будущий инженер технолог-нефтяник был знаком с вопросами контроля и автоматизации в своей области.

Расчеты элементов схем электрических и пневматических приборов и устройств, детальный анализ действия электронных схем и некоторые другие вопросы, которые не являются первостепенными для инженера технолога, в книге или опущены совсем или приведены в ограниченном объеме.

Изучение материала должно сопровождаться лабораторными

занятиями, знакомящими учащихся с приборами, устройством, взаимодействием их узлов и механизмов, а также практическим выполнением некоторых расчетов и поверок основных приборов и регуляторов. Лабораторные занятия должны проводиться по специально разработанной программе и по отдельному пособию.

Автор выражает свою глубокую благодарность П. Ф. Смирнову, В. Г. Дианову, Ю. Н. Михайлову и З. И. Геллеру за ценные указания, сделанные ими при рецензировании рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

В развитии нефтеперерабатывающей и газовой промышленности, как и во всех других отраслях народного хозяйства, неизмеримо большую роль играет автоматизация. Современные технологические процессы переработки нефти и газа отличаются большой производительностью, высокими скоростями потоков и определенными значениями параметров, отклонение которых допускается лишь в самых небольших пределах. Современную технологическую установку или завод в целом нельзя эксплуатировать без применения средств автоматизации.

В нашей стране автоматизации уделяется очень много внимания. В Программе КПСС говорится: «В течение двадцатилетия осуществится в массовом масштабе комплексная **автоматизация** производства со все бо̀льшим переходом к цехам и предприятиям-автоматам, обеспечивающим высокую технико-экономическую эффективность. Ускорится внедрение высокосовершенных систем автоматического управления. Получат широкое применение кибернетика, электронные счетно-решающие и управляющие устройства в производственных процессах промышленности, строительной индустрии и транспорта, в научных исследованиях, в плановых и проектно-конструкторских расчетах, в сфере учета и управления».

Во много раз по сравнению с довоенным временем возрос выпуск новых средств контроля и автоматизации для всех отраслей народного хозяйства. Большое внимание уделяется разработке и выпуску новых приборов и регуляторов.

Развитие автоматизации резко повышает требования к знанию инженерами ее теоретических основ и практики применения. Инженер-технолог, хорошо разбирающийся в технологических процессах, должен быть знаком с вопросами их контроля и автоматизации.

К о н т р о л е м называется наблюдение за величинами различных параметров, характеризующих данный технологический процесс и сбор информации о состоянии оборудования и аппаратуры при помощи современных автоматических средств измерительной техники.

Для правильного выбора и применения средств контроля требуется изучение основ метрологии и теоретических основ действия

различных приборов для измерения давления, температуры, расхода, состава и других параметров, чему и посвящены главы 1—6.

Автоматизацией называется перевод технологических процессов, машин и агрегатов на автоматическую работу, т. е. такую, которая не требует непосредственного вмешательства человека.

Для осуществления автоматизации необходимы различные средства, главными из которых являются средства автоматического регулирования.

Свойства отдельных звеньев систем автоматического регулирования, объектов регулирования и автоматических регуляторов, а также условия, обеспечивающие устойчивую работу этих систем, описываются теорией автоматического регулирования, элементам которой посвящена глава 7. В главе 8 описываются устройство и свойства основных автоматических регуляторов, применяемых в нефтеперерабатывающей и газовой промышленности. Вопросам построения схем автоматического регулирования, применению и обслуживанию средств контроля и автоматизации на заводах посвящена в основном последняя глава 9.

Автоматизация технологических процессов пока носит частичный характер. Регулируются автоматически температура, давление, расход, уровень и некоторые другие параметры в отдельных технологических аппаратах. Оператор, обслуживающий установку, наблюдает за контролируемыми и регулируемыми параметрами и следит за тем, чтобы режим установки соответствовал лучшему качеству целевых продуктов. Однако параметры качества продуктов до сих пор в основном определяются лабораторными методами.

Результаты лабораторных анализов отобранных проб продуктов поступают к оператору с большим запозданием, что затрудняет правильное ведение процесса и получение высококачественного продукта.

В последние несколько лет уровень автоматизации стал резко повышаться. С появлением регуляторов и других приборов унифицированной агрегатной системы (АУС) стали применяться многоконтурные системы регулирования. Появились автоматические приборы контроля качества нефтепродуктов в потоке непрерывного действия, устанавливаемые непосредственно на технологических установках. Это позволяет осуществлять многоконтурные системы регулирования с воздействием на технологические параметры со стороны показателей качества продуктов. Применение многоконтурных систем регулирования по параметрам качества продуктов позволяет осуществить комплексную автоматизацию, т. е. такую, когда все операции по ведению процесса, включая и вспомогательные, осуществляются при помощи приборов и регуляторов автоматически.

На пути комплексной автоматизации стало препятствием применение отдельных приборов для контроля параметров процесса в боль-

шом числе точек установки. Возросли размеры щитов с приборами, оператору стало трудно наблюдать за их показаниями. Чтобы устранить этот недостаток, стали применять малогабаритные приборы, монтируемые в соответствующих местах мнемосхемы технологического процесса, нанесенной на щит контроля. Это в некоторой степени облегчает вести наблюдение за их показаниями и сокращает размеры щитов.

Дальнейшим развитием автоматизации является применение электронных машин централизованного контроля параметров, выполняющих также и некоторые вычислительные функции. Эти машины получают информацию от датчиков измеряемых параметров в виде электрической величины и выдают цифровой результат измерения или вычисления, напечатанный на бланке автоматической пишущей машинки. Машины централизованного контроля очень быстро фиксируют результаты измерения, выдают сигналы об отклонениях параметров от заданных значений, суммируют показания расходомеров и счетчиков, они могут передавать данные на другие электронные вычислительные машины для решения более сложных задач, таких, например, как определение суточного баланса сырья и продукции завода, стоимости продукции и т. п.

Применение машин централизованного контроля делает ненужным применение большого числа обычных приборов и громоздких щитов управления. Однако эти машины еще не заменяют автоматических регуляторов.

Получившая в последние годы развитие кибернетика — наука об общих принципах и законах управления — указывает на новые пути комплексной автоматизации на основе применения управляющих электронно-вычислительных машин. Это требует изучения процессов с установлением зависимостей между отдельными параметрами и факторами, определяющими в конечном счете заданное качество и наиболее экономически выгодный выход целевого продукта. Выраженная математически такая зависимость является основой действия управляющей электронно-вычислительной машины, которая при отклонениях параметров и показателей качества и количества целевого продукта вырабатывает соответствующие командные сигналы управления и перенастройки для нахождения оптимальных условий систем автоматического регулирования.

Осуществление такой автоматизации позволит приблизиться к созданию заводов-автоматов с «кнопочным» управлением из одного диспетчерского пункта.

В настоящей книге не приводится описаний устройств электронных машин. В главе 9 дано лишь общее понятие о действии машины централизованного контроля и о ее возможностях.

Телемеханика, сигнализация и автоблокировка в той или иной степени используются при автоматизации технологических процессов.

Телемеханика получила в последние годы большое развитие и широко применяется главным образом для автоматического управления объектами большой протяженности, такими, например, как нефтепроводы и газопроводы. В этих объектах требуется передавать результаты измерения и различные сигналы на расстояние до нескольких сотен и тысяч километров; передавать командные сигналы для управления задвижками и кранами, установленными по трассе трубопровода, а также системами автоматического запуска и остановки насосных агрегатов перекачечных станций, компрессоров станций перекачки газа и т. п.

Основными элементами систем телемеханики являются датчики измеряемых величин, каналы связи, командные устройства и исполнительные механизмы. Телемеханика широко использует электрические методы измерения, контактные и бесконтактные релейные системы, проводную и беспроводную (радио) связь и т. п.

Теоретические основы и практика телемеханики представляют собой в настоящее время отдельную техническую науку.

В книге из области телемеханики описаны лишь некоторые виды приборов с передачей показаний на сравнительно короткие дистанции в пределах технологических установок или заводов.

Сигнализация применяется как средство оповещения об отклонениях контролируемых параметров свыше допустимых значений и об аварийном состоянии объектов или агрегатов. При автоматизации технологических процессов переработки нефти используется в основном сигнализация об отклонениях параметров. В газовых производствах сигнализация используется для предупреждения об опасной концентрации газа в помещениях, а также как аварийно-предупредительная для вызова человека при нарушении процессов в объектах, эксплуатирующихся без вахтового персонала.

В книге приведены лишь краткие сведения о сигнальных приборах и схемах.

В условиях частичной автоматизации, когда за работой насосов и других машин технологических процессов непрерывно наблюдают люди, автоматическая блокировка не получила большого распространения. При комплексной автоматизации роль автоматической блокировки значительно повышается. При помощи систем автоматической блокировки осуществляются такие операции, как, например, автоматическое включение запасного насоса и выключение вышедшего из строя основного насоса, автоматическое переключение кранов или задвижек при разрыве трубопроводов в целях предупреждения больших потерь нефтепродуктов или газа, прекращение подачи сырья и топлива на установки при авариях и т. п.

Системы и средства автоматической блокировки в своем большинстве являются электрическими, носят специфический характер и в книге не рассматриваются.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

§ 1. ИЗМЕРЕНИЯ

Автоматизация промышленных процессов неразрывно связана с измерениями различных физических величин.

Измерить какую-либо величину значит сравнить ее с некоторым значением этой же величины, принятым за единицу. Измеряют величины при помощи мер, измерительных приборов или измерительных установок. Результат измерения — число именованное, показывающее, во сколько раз измеряемая величина больше единицы измерения или какую составляет долю от нее. Например, измеряя длину какого-либо тела, результат выражают в *мм*, *м*, *км* и т. п., массу — в *г*, *кг*, *т* и т. п.

Единицы измерения делятся на независимые и производные. Независимые единицы устанавливаются произвольно и независимо от размеров других единиц. Производными называются единицы, которые выражаются через независимые единицы на основании математических формул, связывающих измеряемые величины с величинами, единицы которых являются независимыми.

Совокупность независимых и производных единиц, охватывающих определенную область величин, называется системой единиц.

Независимые единицы, на которых строится система, являются основными единицами данной системы.

Существует несколько систем единиц, например механических МКС, СГС и МКГСС, тепловых, электрических и магнитных. В одних странах основные единицы систем приняты метрические, а в других неметрические. Это создает определенные трудности в международных связях в науке, технике и торговле. В связи с этим в октябре 1960 г. 11-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц (SI). Новая система единиц утверждена в качестве Государственного стандарта СССР (ГОСТ 9867-61) и в русском написании обозначается буквами СИ. С 1 января

1963 г. эта система введена в действие для предпочтительного применения.

Основными единицами международной системы СИ являются: метр — единица длины, килограмм — единица массы, секунда — времени, ампер — силы электрического тока, градус Кельвина — термодинамической температуры и свеча — силы света. Производными единицами являются единицы площади, объема, плотности, скорости, ускорения, силы, давления, электрического напряжения, сопротивления, емкости и ряд других.

В системе СИ метр есть длина, равная 1650 763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2\,p_{10}$ и $5\,d_5$ атома криптона 86. Такое определение длины метра как естественного эталона гарантирует его высокую точность, неизменность и дает возможность его воспроизводить и хранить в любой стране.

Измерения подразделяются на прямые, косвенные и совокупные.

П р я м ы м и называются такие, при которых измеряемые величины непосредственно сравниваются с мерой или с показаниями измерительного прибора. Например, измерение длины метром, силы тока амперметром и т. п.

К о с в е н н ы м и измерениями называются такие, при которых значение измеряемой величины вычисляется по результатам прямых измерений других величин, связанных с искомой определенной математической зависимостью. При определении плотности тел путем вычисления предварительно измеряют прямым способом массу и объем и т. п.

С о в о к у п н ы м и называются такие измерения, при которых значение измеряемой величины определяют решением уравнений, полученных из совокупности (ряда) прямых измерений. Примером совокупных измерений может служить определение температурных коэффициентов сопротивления или коэффициентов линейного расширения тел при нагревании, когда в известные уравнения, выражающие зависимость сопротивления или длины тела от температуры, подставляют значения сопротивления или длины при разных температурах, измеренных прямым способом, и затем вычисляют неизвестные коэффициенты путем решения этих уравнений.

В практике контроля промышленных процессов совокупные измерения пока не применяются.

Существует несколько методов прямых измерений, к числу которых относятся метод непосредственной оценки, дифференциальный, нулевой, совпадения и замещения.

При измерениях методом н е п о с р е д с т в е н н о й о ц е н к и величину, подлежащую определению, измеряют непосредственно мерой или измерительным прибором. Длину тела измеряют линейкой, объем жидкости — сосудом определенной емкости, силу тока — амперметром и т. п.

Дифференциальный метод состоит в том, что измеряют не всю величину, а разность между измеряемой величиной и мерой или известной величиной. Например, длину тела можно измерить, приложив к нему линейку и определив разность их длин. Для этого необходимо, чтобы разность была небольшой по сравнению с длиной линейки. Дифференциальный метод достаточно точен. Если разность между длинами тела и линейки составляет 0,1% и эта разность измерена с точностью $\pm 1\%$, то точность измерения длины тела составит $\pm 0{,}001\%$.

Нулевой метод отличается от дифференциального тем, что измеряемая величина уравновешивается известной величиной и разность между ними становится равной нулю. Этот метод применяется при определении массы тел путем взвешивания на равноплечих весах при помощи гирь. Нулевой метод широко применяется при измерениях малых напряжений электрического тока.

Метод совпадения применяют при измерениях длины тела, когда измеряемую величину определяют по совмещению ряда равномерно чередующихся отметок, нанесенных на измеряемое тело и измерительную линейку. Приложив линейку с делениями в английских дюймах к линейке с делениями в *мм*, легко определить, что длина дюйма соответствует 25,4 *мм*. Метод совпадения используется в нониусах штангенциркулей и других приборах, измеряющих длину и толщину тел.

Метод замещения состоит в том, что по какому-либо прибору измерительной установки сначала отсчитывают неизвестную величину, а затем измеряемую величину заменяют известной и добиваются того, чтобы прибор дал такие же показания. Поскольку во время измерения прибор не изменяет своих характеристик, можно утверждать, что неизвестная величина при одинаковых показаниях прибора равна заменяющей ее известной величине. Этот метод отвечает высокой точности, так как свойства прибора не влияют на результат измерения.

§ 2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Для измерений длины тел и объема используются меры без каких-либо измерительных приборов. Но уже при измерении массы тел при помощи меры требуется прибор — весы. Такие величины, как температура, давление, количество и многие другие, измеряют при помощи приборов.

Меры предназначены для вещественного воспроизведения единицы измерения или определенной ее доли или кратной величины. Несмотря на ограниченное применение мер при измерениях величин, характеризующих промышленные процессы, их значение в измерительной технике очень велико.

Мерами являются гири, линейки и рулетки, измерительные колбы, катушки электрического сопротивления и т. п. Различают наборы

мер, например разновесы и магазины мер — наборы, объединенные в одно целое: магазины сопротивления, емкости и др.

Для воспроизведения единиц измерения или кратных и дробных значений используются также физические или другие свойства некоторых веществ. Например, температура таяния льда и кипения воды — для воспроизведения точек температурной шкалы. Такие вещества называются образцовыми и относятся к числу мер.

Измерительные приборы подразделяются на следующие группы.

Компарирующие приборы — такие, которые требуют применения мер: весы с гирями и т. п. Измерять этими приборами без мер нельзя.

Показывающие приборы — такие, которые не требуют применения мер. Они предварительно градуируются в единицах измерения определенных величин путем сравнения с мерами или с более точными образцовыми приборами. К этой группе относится большинство приборов контроля параметров промышленных процессов.

Интегрирующие приборы служат для измерения величин, зависящих от времени — электрические счетчики, счетчики для измерения количества воды и нефтепродуктов и т. п.

Самопишущие приборы — такие, у которых имеется особый механизм для записи результатов измерения на ленточную или дисковую бумажную диаграмму. Самопишущими приборами могут быть как компарирующие, показывающие, так и интегрирующие.

Регулирующие приборы — показывающие или самопишущие — имеют устройство, в котором измеряемая величина управляет потоком какой-либо энергии, воздействующей через регулирующий орган на процесс для поддержания этой же измеряемой величины на заданном значении без вмешательства человека. Регулирующие приборы называются еще автоматическими регуляторами.

Приборы местного действия — такие, которые устанавливаются вблизи места измерения и не имеют устройств для передачи показаний на расстояние (ртутные стеклянные термометры, ареометры и т. п.).

Дистанционные приборы — такие, в которым от места измерения прокладывается линия связи: манометры, установленные вдали от места измерения и т. п. По линиям связи дистанционных приборов передается измеряемая величина. Длина линий связи дистанционных приборов обычно не превышает 150 *м*.

Телеизмерительные приборы — приборы дистанционного действия, но к ним по линии связи передается не измеряемая величина, а другая, пропорциональная ей. Например, показания манометра преобразовываются в напряжение электрического тока, который передается по проводам к другому прибору. В качестве канала связи могут быть использованы не только провода и кабели, но и радиосвязь. Телеизмерительные системы электрического дей-

ствия могут передавать показания на очень большие расстояния, достигающие сотен и тысяч километров. Существуют телеизмерительные системы пневматического действия с передачей показаний на расстояние до 300 *м*.

Прибор, непосредственно измеряющий какую-либо величину и снабженный устройством для телепередачи показаний, принято называть датчиком, а прибор, к которому передаются показания по линиям связи — приемником или вторичным прибором.

Образцовые меры и приборы предназначены для воспроизведения и хранения единиц измерения, а также для поверки и градуировки мер и измерительных приборов. Это особо важная группа приборов, так как с их помощью обеспечивается единство измерений в стране.

Рабочие меры и приборы в отличие от образцовых предназначены для практических измерений. Они делятся на: лабораторные меры и приборы, при применении которых учитывается точность измерения; технические меры и приборы; при использовании последних принимается определенная заранее установленная точность измерения.

Измерительная установка — совокупность мер и приборов или одних приборов и различных приспособлений, объединенных в одно целое общей схемой или методом измерения: установки для поверки термометров, термопар и т. п.

Измерительные автоматы — приборы или измерительные установки, автоматически выполняющие измерение заданной величины: автоматические весы, автоматы для разлива жидкости в тару определенного объема и т. п.

§ 3. ОБРАЗЦОВЫЕ МЕРЫ И ПРИБОРЫ

Образцовые меры и приборы подразделяются на эталоны и образцовые меры и приборы ограниченной точности.

Эталонами называются образцовые меры и приборы, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерения с метрологической точностью, т. е. наивысшей достижимой точностью измерения при настоящем состоянии измерительной техники.

Образцовые меры и приборы ограниченной точности имеют установленную точность, меньшую, чем метрологическая, и служат для практических работ по поверке и градуировке других мер и приборов. При помощи образцовых мер и приборов ограниченной точности передают правильный размер единицы измерения от эталонов к рабочим мерам и приборам.

По соподчинению эталоны, воспроизводящие одну и ту же единицу измерения, делятся на первичные, вторичные и третичные.

Первичные эталоны являются государственными эталонами СССР.

В т о р и ч н ы е эталоны являются эталонами, устанавливаемыми на основании сличения их с метрологической точностью с первичными эталонами.

Т р е т и ч н ы е эталоны являются эталонами, устанавливаемыми на основании сличения их с метрологической точностью с вторичными эталонами. Третичные эталоны являются рабочими и применяются для поверки образцовых мер и приборов.

По своему метрологическому назначению или по той роли, которую выполняют эталоны в деле сохранения единиц измерения, эталоны разделяются на основные, производные, эталоны-свидетели, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие.

О с н о в н ы м и эталонами называются первичные эталоны независимых (основных) единиц, составляющие законную и научную основу измерительного дела в стране; к их числу относятся основные эталоны метра, килограмма, абсолютной практической единицы силы тока.

Основные эталоны метра и килограмма, хранящиеся в Международном бюро мер и весов в г. Париже, называются международными прототипами, они считаются абсолютно точными и не имеющими погрешностей.

Эталоны метра и килограмма, хранящиеся в центральных метрологических учреждениях отдельных государств, называются национальными прототипами. Международные прототипы являются первичными эталонами по отношению к национальным.

В СССР национальными прототипами являются эталон метра № 28 и эталон килограмма № 12, полученные Россией в 1889 г. от Международного бюро мер и весов. Тогда же были получены эталон метра № 11 и килограмма № 26, которые являются эталонами-копиями.

Национальные прототипы и их копии хранятся и воспроизводятся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии (ВНИИМ) им. Д. И. Менделеева в г. Ленинграде.

П р о и з в о д н ы е эталоны являются первичными и служат для воспроизведения производных единиц. Они также являются государственными эталонами. Эталоны-с в и д е т е л и являются вторичными и служат для контроля неизменности первичных эталонов. Эталоны-к о п и и — вторичные, служат для сличения с ними рабочих эталонов. Эталоны с р а в н е н и я — вторичные, служат для сличения эталонов друг с другом.

Р а б о ч и е эталоны служат для текущих метрологических работ. Они могут быть первичными, вторичными и третичными. Все третичные эталоны являются рабочими и применяются для поверки образцовых мер и приборов. Рабочие эталоны изготовляются из более дешевых материалов и требуют более частых контрольных сличений их с первичными эталонами или их копиями.

Образцовые меры и приборы ограниченной точности делятся на разряды в зависимости от точности и способа их поверки.

Образцовые меры и приборы первого разряда поверяются непосредственно по рабочим эталонам, меры и приборы второго, третьего и последующих разрядов — по образцовым мерам и приборам предшествующих разрядов.

По образцовым мерам и приборам поверяются все рабочие меры и измерительные приборы, применяющиеся в народном хозяйстве страны.

§ 4. ПОГРЕШНОСТИ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Различают номинальное и действительное значение меры. Под первым подразумевается то значение, которое должна представлять мера. Например, на гире написан ее размер 1 *кг*, это и есть номинальное значение. Действительное же значение гири может отличаться от 1 *кг* и может быть установлено путем сличения ее с образцовой мерой.

Когда измеряют каким-либо прибором, то пользуются его показаниями, которые также в большей или меньшей степени всегда отличаются от действительного значения измеряемой величины. В связи с этим различают показание прибора и действительное показание, причем последним называется показание данного прибора, определяемое на основании сличения с образцовыми мерами или с показаниями образцовых приборов.

Та разность, на которую отличается номинальное значение меры от ее действительного значения, называется погрешностью меры.

Разность между показанием прибора и действительным показанием того же прибора называется погрешностью показания прибора.

Погрешности меры и показаний прибора выражаются в тех же именованных числах, которые характеризуют результат измерения. Если мера была метром, то и погрешность выражается в метрах или для удобства в миллиметрах. Если показания прибора выражались в градусах температуры, то и его погрешность выражается в градусах температуры.

Такая погрешность мер и показаний прибора называется абсолютной и может иметь знак плюс или минус.

Погрешность значения меры или показания прибора, взятая с обратным знаком, называется поправкой. Если величина поправки известна, то действительное значение меры или действительное показание прибора может быть определено путем алгебраического сложения номинального значения меры или показания прибора с величиной поправки.

Погрешность можно выразить в процентах от номинального значения меры. В этом случае она называется номинальной относительной погрешностью. Если эту погреш-

ность обозначить через $d_н$, абсолютную через ε, а номинальное значение меры через $A_н$, то согласно определению

$$d_н = \frac{\varepsilon}{A_н} 100\%. \tag{1.1}$$

Погрешность измерительных приборов часто выражают в процентах от диапазона шкалы. Такая погрешность называется приведенной относительной погрешностью.

Существуют приборы со шкалой, нижний предел которой равен нулю. У некоторых приборов нижний предел не равен нулю, например ртутный термометр со шкалой 100—300° С; такая шкала называется безнулевой или с утопленным нулем. Есть приборы, у которых нижний предел имеет отрицательное значение — термометр со шкалой $-50 \div 0 \div +100°$. Такая шкала называется двусторонней.

Приведенную относительную погрешность для приборов со шкалой, начинающейся от нулевого значения измеряемой величины, определяют в процентах от верхнего предела измерения, для приборов с безнулевой шкалой — от среднего арифметического пределов измерения, а для приборов с двусторонней шкалой — от суммы пределов измерения.

Погрешность измерения выражают еще в долях или процентах от действительного значения меры или действительного показания прибора, и тогда она называется действительной относительной погрешностью.

Величина погрешности характеризует точность меры или прибора, а следовательно, и результат измерения. Если требуется измерить более точно, необходимо пользоваться мерами и приборами с малой погрешностью. Однако изготовить меру или прибор без погрешности невозможно. Меры и приборы с малой погрешностью сложные, стоят дорого и требуют очень осторожного обращения. Для технических измерений пользуются мерами и приборами, имеющими определенную допустимую погрешность, не превышающую заранее заданное значение.

Допустимой погрешностью называется наибольшая погрешность значения меры или показания прибора, допускаемая нормами.

В связи с тем, что величина погрешности может зависеть от внешних условий, при которых производится измерение (от окружающей температуры, давления атмосферы, наличия вибраций и т. п.), различают еще основную и дополнительную погрешности меры или прибора.

Основной погрешностью называется допустимая погрешность при нормальных условиях работы, устанавливаемых для каждой меры или прибора в отдельности техническими условиями.

Дополнительной погрешностью называется погрешность, вызываемая воздействиями внешней среды на меры или прибор при откло-

И. А. Н

нении условий от нормальных. Если за нормальную температуру было принято +20°, а прибор работает при +40°, то может возникнуть дополнительная погрешность, которая увеличит основную погрешность.

Величина основной допустимой погрешности мер и приборов устанавливается стандартом, нормалями и правилами. Она может быть выражена в виде предельных значений абсолютной или относительной погрешности. Для гирь допустимая погрешность устанавливается в виде абсолютной погрешности, выраженной в миллиграммах, для мер длины в миллиметрах, для эталонных и образцовых термометров сопротивления, термопар, ртутных термометров в виде абсолютной погрешности в °С, для эталонных и образцовых манометров в виде действительной относительной погрешности, выраженной в процентах от измеряемого давления.

Для большинства рабочих измерительных приборов, используемых при технических измерениях, допустимая основная погрешность выражается в виде приведенной относительной погрешности в процентах от диапазона шкалы. Эти приборы подразделяются на классы точности, обозначаемые рядом чисел: 0,005, 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 и 6,0. Каждое из этих чисел показывает величину основной допустимой погрешности. Погрешность прибора класса 1,5 составляет ±1,5% от диапазона шкалы, прибора класса 0,02 — ±0,02% и т. д.

Приборы классов 0,005; 0,02; 0,05 и 0,1 считаются приборами высокой точности и применяются в лабораторных условиях, а также для поверки рабочих приборов, применяемых в технических измерениях.

Наиболее распространенные в промышленности приборы имеют класс точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,5. Приборы класса 4,0 и 6,0 применяются при измерениях, не требующих высокой точности. В некоторых случаях выпускают приборы промежуточных значений класса точности. Например выпускают образцовые пружинные манометры класса точности 0,35.

Качество измерительных приборов, кроме их погрешности, характеризуется еще вариацией, чувствительностью и порогом чувствительности.

Вариацией прибора называют наибольшую разность между повторными показаниями, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях. Вариация выражается обычно в процентах от диапазона шкалы и не должна превышать допустимую основную погрешность. Вызывается вариация силами трения в подвижных элементах прибора.

Чувствительностью прибора называется отношение приращения линейного или углового перемещения указателя

к приращению измеряемой величины, вызвавшей это перемещение в установившемся состоянии:

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta A}, \qquad (1.2)$$

где S — чувствительность;
Δn — приращение перемещения указателя;
ΔA — приращение измеряемой величины.

Поскольку существуют измерительные приборы без указателя (интегрирующие приборы — счетчики), чувствительность следует определять как отношение приращения выходной величины к приращению входной величины данного прибора при установившемся состоянии. Для приборов входной величиной является измеряемая величина, а выходной их показания. Показания могут быть выражены перемещениями указателя, изменением числа оборотов счетчика, цифровой записью другими параметрами. Для электрического счетчика чувствительность определится из отношения приращения числа оборотов его рабочего диска к приращению силы тока.

Чем выше чувствительность, тем больше приращение выходной величины при одном и том же приращении входной величины. Приборами, имеющими высокую чувствительность, измерять можно более точно.

Для приборов с указателем и шкалой величина, обратная чувствительности C, называется ценой деления:

$$C = \frac{\Delta A}{\Delta n}. \qquad (1.3)$$

Делением шкалы называется расстояние между двумя соседними отметками (штрихами или точками). Цена деления характеризует приращение измеряемой величины, которое перемещает указатель на одно деление.

П о р о г о м ч у в с т в и т е л ь н о с т и называется наименьшее изменение значения измеряемой величины, способное вызвать изменение показаний прибора.

§ 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ

Перечисленные выше свойства приборов — погрешность показаний, чувствительность и другие — называются с т а т и ч е с к и м и характеристиками, так как все они определяются при установившемся состоянии механизмов приборов.

Но качество приборов определяется еще и их д и н а м и ч е с к и м и х а р а к т е р и с т и к а м и, которые показывают, как реагируют приборы на изменения измеряемой величины, каково запаздывание во времени между показаниями приборов и измеряемой величиной при ее изменении. По динамическим характеристикам

определяют, будет ли показание прибора носить колебательный характер или нет.

Динамические характеристики приборов в некоторых случаях определяют и их конструктивное выполнение. Если подвижная система прибора подвержена колебаниям, то применяют специальные успокоители, чтобы колебания указателя были минимальными. Для уменьшения времени реагирования, например, ртутного термометра толщину стенок стеклянного шарика, в котором находится ртуть, делают по возможности минимальной.

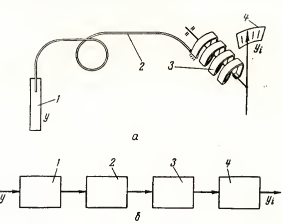


Рис. 1.1. Схема манометрического термометра (*а*) и его структурная схема (*б*).

1 — чувствительный элемент; *2* — линия связи; *3* — реагирующий элемент; *4* — шкала.

Каждый измерительный прибор можно рассматривать как систему отдельных последовательно соединенных между собой звеньев, выполняющих различные функции. В качестве примера приведем манометрический термометр, в котором температура измеряется по величине давления жидкости, газа или паров, нагреваемых в замкнутом объеме (рис. 1.1). Система состоит из четырех звеньев, каждое из которых характеризуется входной и выходной величинами. В нашем примере для первого звена входная величина y — измеряемая температура, а выходная — температура среды, находящейся в баллоне. Для второго звена, линии связи, которую образует среда, находящаяся в соединительной трубке и в пружине реагирующего элемента, входная величина — температура среды внутри баллона, а выходная — давление среды. Для третьего звена входная величина — давление среды в системе, а выходная — перемещение указателя. Для четвертого звена входная величина — перемещение указателя, а выходная — показания прибора y_i, отсчитываемые по шкале.

Выходная величина предыдущего звена является входной последующего.

В приборах, измеряющих давление, отдельного чувствительного элемента нет, им является реагирующий элемент и, следовательно, число звеньев системы уменьшается до трех. Существуют и более сложные системы.

От каждого прибора требуется, чтобы он по возможности точно и без запаздывания во времени показал значение измеряемой им величины. Это во многом зависит от динамических характеристик отдельных звеньев прибора, которые должны передать в прямом или в преобразованном виде входную величину первого звена последнему.

Не ставя задачи подробного рассмотрения динамических характеристик отдельных звеньев измерительных систем, ограничимся лишь общими замечаниями, касающимися всей системы в целом.

В большинстве измерительных приборов контроля производственных процессов динамические свойства определяются в основном свойствами чувствительного элемента. Соединительное звено обычно делают по возможности безынерционным, и оно существенного влияния на свойства прибора не оказывает. Реагирующий элемент также выполняют малоинерционным. Но во многих случаях реагирующий элемент является звеном, склонным к колебаниям, а иногда и достаточно инерционным. В этих случаях свойства реагирующего элемента также определяют качество прибора.

Чувствительный элемент приборов для измерения температуры (термопара, термометр сопротивления и др.) обычно помещают в защитный чехол, который затрудняет передачу тепла и приводит к запаздыванию и к неточности показаний прибора.

Динамические характеристики приборов можно определить экспериментально путем создания быстрого ступенчатого измерения входной величины и построения кривой переходного процесса, отражающего характер изменения показаний прибора от одного установившегося состояния до нового установившегося состояния. Так, например, кривую переходного процесса манометрического термометра определяют по изменению показаний при быстром погружении чувствительного элемента в ванну с горячей водой или маслом. Формы возможных видов кривых переходных процессов показаны на рис. 1. 2. Колебательный процесс свойствен приборам для измерения давления и гальванометрам, поскольку в движении участвуют массы их подвижных элементов. Апериодический процесс первого порядка наблюдается у приборов для измерения температуры, чувствительный элемент которых не заключен в защитный чехол. Апериодический процесс второго порядка относится к приборам, измеряющим температуру, в которых чувствительный элемент заключен в достаточно массивный защитный чехол. Каждый из этих переход-

ных процессов описывается характерным для него дифференциальным уравнением *.

Скорость реагирования прибора оценивают величиной постоянной времени τ, которая равна времени, в течение которого показания прибора достигают 63,2% максимального значения при скачкообразном изменении измеряемой (входной) величины. При измерениях быстро изменяющихся величин постоянная времени прибора должна быть очень малой, что достигается применением электронных схем.

Если, например, прибором, переходный процесс которого апериодический первого порядка, измерять непрерывно изменяющуюся величину, то показания его будут отставать от измеряемой величины на время AB, которое называется запаздыванием рис. 1.3. Отрезок CB, который показывает, насколько в данный момент времени показания меньше измеряемой величины, называют динамической ошибкой. Наиболее точно можно измерить какую-либо величину лишь тогда, когда она не изменяется. При колебательном изменении величины показания всегда отстают и не вполне точны.

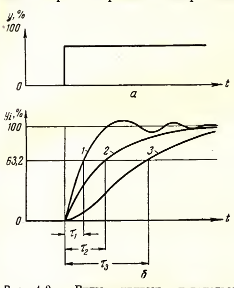


Рис. 1.2. Виды кривых переходных процессов измерительных приборов.

а — изменение входной величины y; *б* — кривые переходного процесса показаний прибора y_i. *1* — колебательный процесс; *2* — апериодический процесс 1-го порядка; *3* — апериодический процесс 2-го порядка.

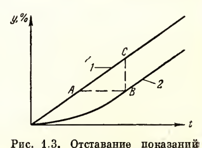


Рис. 1.3. Отставание показаний прибора от измеряемой величины при ее непрерывном изменении.

1 — измеряемая величина; *2* — показания прибора; *t* — время.

* Свойства отдельных звеньев и всей измерительной системы исследуются как методом построения кривой переходного процесса, так и частотным методом подобно тому, как исследуются свойства звеньев и системы автоматического регулирования, о чем сказано в главе 7 «Элементы линейной теории автоматического регулирования».

Во многих случаях, когда измеряемая величина изменяется медленно, запаздывание и динамическая ошибка практически незаметны и их не учитывают. Но при быстрых изменениях для получения точных результатов измерения как запаздывание, так и динамическую ошибку необходимо учитывать.

§ 6. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Как бы тщательно ни было измерение, всегда результат его отличается от истинного значения измеряемой величины, точное значение которого остается неизвестным. В связи с этим измерение имеет ценность лишь тогда, когда известна его погрешность, которая дает возможность определить степень достоверности полученного значения. Погрешности измерения возникают от погрешности мер и приборов при обращении с ними и от личных ошибок наблюдателя проводящего измерения.

Погрешности измерения подразделяются на *систематические*, *случайные* и *промахи*.

Систематическими погрешностями называются погрешности, постоянные или изменяющиеся по определенному закону, природа и характер которых известны. Возникают систематические погрешности, например, от погрешности меры из-за неточности ее изготовления, от неучтенной погрешности измерительного прибора, вызванной неправильной его установкой, или от влияния изменения окружающей температуры.

При измерениях принимают меры, исключающие или уменьшающие систематические погрешности.

Случайными называются погрешности, неопределенные по величине и природе и появление которых не подчиняется какой-либо закономерности.

Если измерять многократно одну и ту же величину одним и тем же прибором или мерой с одинаковой тщательностью и в одинаковых окружающих условиях, то каждое измерение будет отличаться от других. В этом и проявляются случайные погрешности. В связи с этим для получения большей достоверности одну и ту же величину измеряют несколько раз, получают ряд погрешностей, на основании которых устанавливают более или менее правильное значение погрешности результата.

Промахами называют погрешности, явно искажающие результат измерения. Промахи вызываются обычно неправильными действиями человека при отсчете значений по шкале прибора, при записи показаний, сборке схемы измерения и т. п. Промахи отличаются от случайных погрешностей при повторном измерении одной и той же величины бо́льшим значением.

Измерения, содержащие промахи, не учитываются и отбрасываются из ряда измерений.

Случайные погрешности определяются как разность между полученным значением измеряемой величины и ее истинным значением x.

Получив ряд значений случайных погрешностей при многократном измерении одной и той же величины, можно определить их влияние на результат измерения, пользуясь теорией случайных погрешностей.

Однако истинное значение измеряемой величины можно установить лишь при пользовании эталонами или образцовыми приборами, значения и показания которых (после внесения соответствующих поправок) можно считать за истинные. В большинстве же практических измерений истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, поэтому часто случайные погрешности определить нельзя. В связи с этим при измерениях определяют так называемые остаточные погрешности, которые подчиняются законам случайных погрешностей.

Остаточной погрешностью v называется разность между значением величины, полученной путем однократного измерения, и средним арифметическим значением L этой же величины, полученной из ряда повторных ее измерений.

При практических измерениях погрешность оценивают обычно при помощи средней квадратичной погрешности σ, которую можно выразить через остаточные погрешности:

$$\sigma = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \ . \ . \ . + v_n^2}{n-1}}\ , \qquad (1.4)$$

где n — число измерений одной и той же величины.

Чем меньше средняя квадратичная погрешность, тем больше точность измерения.

Погрешность можно выразить в относительных единицах, например в процентах от среднего арифметического:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{L}\,100, \qquad (1.5)$$

где σ_0 — относительная средняя квадратичная погрешность.

При косвенных измерениях измеряемую величину вычисляют по формуле, связывающей ряд величин, полученных путем прямых измерений. В общем виде зависимость измеряемой величины Q от величин X, Y, Z, полученных путем прямых измерений, можно представить функцией

$$Q = f(X,\ Y,\ Z,\ .\ .\ .). \qquad (1.6)$$

Если зависимость Q от X, Y, $Z, \ldots$ имеет вид:

$$Q = kX^aY^bZ^c, \qquad (1.7)$$

то относительная средняя квадратичная погрешность результата косвенного измерения выражается формулой

$$\sigma_0 = \sqrt{a^2 \sigma_{0X}^2 + b^2 \sigma_{0Y}^2 + c^2 \sigma_{0Z}^2}, \qquad (1.8)$$

где σ_{0X}, σ_{0Y} и σ_{0Z} — относительные среднеквадратичные погрешности прямых измерений величин X, Y, Z.

Пример. Определить среднюю квадратичную относительную погрешность результата косвенного измерения расхода жидкости, определяемого по формуле (в упрощенном виде)

$$G = k\,\alpha\,d^2 \sqrt{\Delta p\,\gamma}, \qquad (1.9)$$

где k — постоянный коэффициент;
α — коэффициент расхода;
d — диаметр отверстия диафрагмы в *мм*;
Δp — перепад давления в *кГ/м²*;
γ — удельный вес жидкости в *кГ/м³*.

Если установить, что средние квадратичные относительные погрешности для величин, входящих в формулу (1. 8), составляют для α — 1,2, d — 0,1; Δp — 0,9, γ — 0,2, то погрешность результата определится из (1. 8):

$$\sigma = \sqrt{1{,}2^2 + 4 \cdot 01^2 + {}^1/_4 \cdot 0{,}9^2 + {}^1/_4 \cdot 0{,}2^2} = 1{,}3\%.$$

§ 7. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В СССР

Высшим органом государственной службы мер и измерительных приборов является Комитет стандартов, мер и измерительных приборов СССР.

Основной задачей государственной службы является обеспечение единообразия, верности и правильного применения мер и измерительных приборов во всех отраслях народного хозяйства. Государственная служба осуществляет также связь с международной службой мер и весов, которая ведает единицами и эталонами различных величин.

Свою основную задачу государственная служба выполняет проведением надзора и обязательной поверки применяемых всех основных мер и измерительных приборов.

Надзор состоит в наблюдении и контроле за правильной эксплуатацией мер и приборов на предприятиях. Поверкой называется сравнение мер и показаний измерительных приборов с образцовыми мерами или показаниями образцовых приборов в целях определения погрешностей.

Надзор и поверка выполняются органами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов; в этом случае они носят характер

государственных. Допускается надзор и поверка силами самих предприятий и учреждений, и тогда они называются ведомственными.

Органы государственого надзора и поверки представлены научно-исследовательскими институтами, управлениями и отделениями с оборудованными лабораториями в городах страны, имеющими в своих штатах государственных поверителей.

Органы ведомственного надзора находятся под контролем государственных органов и могут быть организованы на крупных предприятиях, изготовляющих, ремонтирующих или эксплуатирующих меры или приборы. Органы ведомственного надзора обязательно регистрируются в органах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. В функции органов ведомственного надзора входят: проведение учета, паспортизация мер и приборов, наблюдение за правильной эксплуатацией, изъятие незаконных и неисправных мер и приборов и связь с органами Комитета по всем вопросам измерительного хозяйства.

Образцы новых измерительных приборов, разработанные институтами, конструкторскими бюро, заводами и т. п., в целях установления целесообразности их производства подвергаются государственным испытаниям. При испытаниях прибор (или мера) поверяются как при нормальных условиях, так и в условиях, отличающихся от нормальных, с целью установления их основной и дополнительных погрешностей. Испытаниями устанавливается соответствие метрологических показателей мер и приборов современному состоянию измерительной техники. Государственным испытаниям подлежат также образцы приборов, намечаемых к получению из-за границы.

Все новые меры и измерительные приборы, выпускаемые приборостроительными заводами и другими предприятиями, подлежат обязательной государственной поверке.

Предприятия, учреждения и организации, применяющие меры и измерительные приборы, должны производить их обязательную поверку в установленные сроки путем предъявления их государственному поверителю или силами ведомственного надзора.

Если поверяемые меры или приборы не отвечают требованиям и нормам их погрешности, вариации, качества их внешнего оформления и т. п., то они признаются незаконными и должны быть изъяты из употребления. Допускаются их ремонт и повторная поверка.

Все меры и измерительные приборы после их ремонта также подлежат обязательной государственной или ведомственной поверке.

Подробные списки мер и измерительных приборов, сроки их обязательной периодической поверки изложены в специальных материалах, издаваемых Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов.

На каждую меру или прибор после поверки, если они признаны годными, наносят оттиск поверительного клейма.

Поверительные клейма изготовляются и выдаются организациям только органами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. На клеймах имеется изображение двух последних цифр календарного года, в течение которого меры или приборы могут эксплуатироваться. Клеймо можно наносить и на пломбу, прикрепляемую к корпусу прибора. Пломбу обычно закрепляют в таком месте, в котором при вскрытии прибора ее обязательно нужно сорвать. Это недопускает эксплуатацию приборов, не прошедших поверку после их ремонта. Меры и приборы без клейма госповерки считаются незаконными.

На меры и измерительные приборы, при пользовании которыми необходимо учитывать их погрешности, выдаются свидетельства или выпускные аттестаты установленной формы, в которых приводятся результаты поверки и погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдун Г. Д. Единицы физических величин. Издание второе. Государственное издательство стандартов, 1962.

2. Маликов С. Ф. Введение в технику измерений. Издание второе. Машгиз, 1952.

3. Маликов М. Ф. Основы метрологии. Издание Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949.

4. Калашников Н. В., Стоцкий Л. Р. Международная система единиц. Приборостроение, № 4, 1962.

5. Яковлев Л. Г. Погрешности контрольно-измерительных приборов и датчиков. Машгиз, 1961.

6. Андерс В. Р. Контрольно-измерительные приборы. Вводный курс. Гостоптехиздат, 1958.

7. Правила 12-58 организации и проведения поверки мер и измерительных приборов и контроля за состоянием измерительной техники, соблюдением стандартов и технических условий. Издание Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1960.

ГЛАВА 2

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

§ 1. ПОНЯТИЕ О ДАВЛЕНИИ. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Давление есть сила, нормально действующая на единицу площади, и определяемая из соотношения

$$p = \frac{G}{S}, \tag{2. 1}$$

где p — давление;
G — сила;
S — площадь.

Причем сила должна быть равномерно распределена по всей площади.

Единица давления, как это следует из определения, есть производная единица.

В системе СГС (сантиметр — грамм — секунда), в которой единицей силы является дина (*дин*), а единицей площади квадратный сантиметр (*см*^{2}), единица давления *дин/см*^{2}.

В системе единиц МКГСС (метр — килограмм-сила — секунда) единицей давления является *кГ/м*^{2}.

В Международной системе единиц СИ за единицу давления принято давление в один ньютон на один квадратный метр (*н/м*^{2}). Эта единица имеет малый размер, поэтому для технических расчетов и измерений рекомендуется применять внесистемную единицу давления — бар, равный 10^5 *н/м*^{2}.

В технических измерениях получил распространение ряд внесистемных единиц давления, к которым относятся:

1) килограмм-сила на квадратный сантиметр (*кГ/см*^{2}) или техническая атмосфера (обозначается через *ат*);

2) миллиметр ртутного столба (*мм рт. ст.*) характеризует давление, оказываемое на горизонтальную плоскость столбом ртути высотой 1 *мм* при 0° С и ускорении силы тяжести 980,665 *см/сек*^{2};

3) миллиметр водяного столба (*мм вод. ст.*) характеризует давление, оказываемое на горизонтальную плоскость

столбом воды в 1 *мм* при 4° С и ускорении силы тяжести 980,665 *см/сек*^{2}.

Кроме того, в технике применяются следующие единицы давления.

Физическая атмосфера (*атм*) — давление, оказываемое на горизонтальную плоскость столбом ртути высотой 760 *мм* при плотности ртути 13, 5951, 0° С и ускорении силы тяжести 980,665 *см/сек*^{2}. В СССР физическая атмосфера к официальному применению не допущена.

Английский фунт на квадратный дюйм (lb/in^2) применяется в основном в Англии и США.

Величину давления в одной из единиц измерения можно выразить в любых других единицах измерения. Так, например:

$$1\ кГ/см^2\ (ат) = 98066{,}5\ н/м^2 = 0{,}980665\ бар = 735{,}56\ мм\ рт.\ ст. = 10\,000\ мм\ вод.\ ст.;$$

$$1\ бар = 10^5\ н/м^2 = 1{,}02\ кГ/см^2 = 750\ мм\ рт.\ ст. = 10{,}2\cdot 10^3\ мм\ вод.\ ст.;$$

$$1\ \mathrm{lb/in^2} = 6{,}895\cdot 10^3\ н/м^2 = 0{,}0703\ кГ/см^2 = 51{,}71\ мм\ рт.\ ст. = 703\ мм\ вод.\ ст.$$

Различают давление абсолютное и избыточное. Абсолютным называют истинное давление; избыточным — давление, отсчитываемое от условного нуля, в качестве которого принято атмосферное давление. Оба эти вида давлений могут быть выражены одними и теми же единицами. Избыточное давление еще называют и манометрическим.

Для различия к обозначению величины добавляют слово абсолютное или избыточное в зависимости от принятого вида давления, например, $p_{абс} = 1{,}75\ кГ/см^2$ или $p_{изб} = 5\ ат$.

Давление атмосферного воздуха часто называют барометрическим.

Избыточное давление можно перевести в абсолютное с учетом барометрического давления по формуле

$$p_{абс} = p_{изб} + \frac{p_{бар}}{735{,}56} \qquad (2.\ 2)$$

где $p_{абс}$ — абсолютное давление в *кГ/см*^{2};

$p_{изб}$ — избыточное давление в *кГ/см*^{2};

$p_{бар}$ — барометрическое давление в данной местности в *мм рт. ст.*

Если в каком-либо сосуде давление при откаче из него воздуха стало ниже атмосферного, то говорят, что в сосуде создан вакуум.

Величина вакуума в технике обычно выражается абсолютным давлением в *мм рт. ст.* Абсолютное давление ниже атмосферного иногда называют остаточным.

Термин вакуум часто заменяют разрежением, причем под последним подразумевают разность между атмосферным давлением и более низким абсолютным. Например, если в сосуде абсолютное давление равно 80 *мм рт. ст.*, то разрежение выразится числом $760-80 = 680$ *мм рт. ст.*

В некоторых случаях измеряют разность между двумя давлениями, называемую дифференциальным давлением или перепадом давления.

Диапазон давлений, применяемых в технике, весьма широк. В вакуумных лампах и деталях некоторых приборов поддерживается очень низкое абсолютное давление до 10^{-8} *мм рт. ст.* Технологические процессы переработки нефти протекают при абсолютных давлениях от 40—60 *мм рт. ст.* (вакуумная перегонка мазутов) до 700 *кГ/см²* (гидрогенизация нефти).

Многие процессы протекают при давлениях 2—3 *кГ/см²* (первичная перегонка нефти), 60—70 *кГ/см²* (крекинг) и т. д. Обычно в аппаратуре одной и той же технологической установки могут быть самые различные по величине давления, начиная от разрежения и кончая десятками и сотнями *кГ/см²*.

Для измерения давления в таком широком диапазоне создано много разновидностей приборов, которые по принципу действия делятся на пять основных групп (ГОСТ 1646-42): жидкостные, поршневые, пружинные, электрические и пьезоэлектрические.

Кроме того, по роду измеряемой величины различают следующие приборы для измерения давления (ГОСТ 1646-42).

1. Манометры — для измерения средних и высоких избыточных давлений.
2. Вакуумметры — для измерения разрежения (вакуума).
3. Мановакуумметры — для измерения средних и больших избыточных давлений и вакуума.
4. Микроманометры (напоромеры) — для измерения малых (до 500 *мм вод. ст.*) давлений.
5. Микроманометры (тягомеры) — для измерения малых разрежений (вакуума), выражаемых в *мм вод. ст.*
6. Микроманометры (тягонапоромеры) — для измерения малых (до 500 *мм вод. ст.*) давлений и разрежений в *мм вод. ст.*
7. Дифференциальные манометры — для измерения разности давлений с градуировкой в *мм рт. ст.* и *мм вод. ст.*
8. Барометры — приборы для измерения атмосферного давления с градуировкой в *мм рт. ст.*

§ 2. ЖИДКОСТНЫЕ ПРИБОРЫ

Действие жидкостных приборов основано на уравновешивании измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости. Такими приборами измеряют избыточное давление, вакуум и перепад давления.

Наиболее распространенным является U-образный манометр (рис. 2. 1). Он состоит из согнутой стеклянной трубки, заполненной жидкостью до половины высоты. Трубка укреплена на доске *2* в вертикальном положении. Между трубками расположена шкала *3* с делениями в *мм*. Нуль шкалы находится в середине длины трубки. Измеряемое давление подводится к одному из концов трубки, второй конец которой сообщается с атмосферой. Под действием измеряемого давления жидкость в трубке перемещается из одного колена в другое.

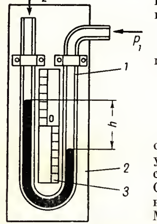


Рис. 2.1. U-образный манометр.

1 — U-образная трубка; *2* — доска; *3* — шкала.

Гидростатическое давление столба жидкости в открытом колене уравновешивает измеряемое давление.

$$p = h\gamma, \qquad (2.3)$$

где p — измеряемое избыточное давление в *кГ/см²*;

h — высота уравновешивающего столба жидкости в *см*;

γ — удельный вес жидкости в *кГ/см³*.

Здесь имелось в виду, что над жидкостью в трубках находится газ (или воздух), удельный вес которого ничтожно мал по сравнению с удельным весом жидкости. Обычно в U-образных манометрах применяют ртуть, воду, легкое масло и т. п. Манометром, заполненным ртутью, можно измерять более высокие давления, чем при заполнении его водой или другой, более легкой жидкостью. Во всех случаях пределы измерения манометра определяются длиной U-образной трубки. Практически при заполнении ртутью такими манометрами измеряют давление до 1500 *мм рт. ст.*

U-образным манометром можно измерять и вакуум. При этом жидкость из левой части трубки будет перемещаться в правую, и величина вакуума в этом случае определяется высотой уравновешивающего столбом жидкости в манометре.

U-образным манометром можно измерять и разность двух давлений. При этом к трубкам подают давления p_1 и p_2, причем $p_1 > p_2$. В этом случае

$$p_1 - p_2 = h\gamma. \qquad (2.4)$$

При технических измерениях разности давлений применяют д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы й м а н о м е т р (рис. 2. 2). Он состоит из двух колодок, верхней *4* и нижней *1*, прикрепленных к доске *10*, в которых закреплены две стеклянные трубки *2*, образующие вместе с каналом в нижней колодке U-образный манометр. Трубки заполняются ртутью (или другой жидкостью).

Давления подводятся к штуцерам через вентили *6* и *8* по стальным трубкам. Вентили *5* и *9* используются при продувке этих трубок, вентиль *11* при сливе ртути в случае чистки прибора. Манометр *7* показывает величину более высокого давления, которое отсчитывают по шкале *3*. Таким дифференциальным манометром можно измерять перепад до 1000 *мм рт. ст.* при давлениях до 150 *кГ/см²*.

При некоторых измерениях над жидкостью в дифференциальном манометре может быть не воздух (или газ), а другая жидкость. Например, если измеряют разность двух давлений водяного пара, то в трубках над ртутью может скопиться конденсат пара, т. е. вода. В этом случае измеряемая разность давления определяется по формуле

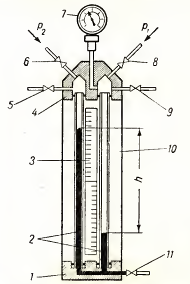


Рис. 2. 2. Дифференциальный манометр.



Рис. 2. 3. Чашечный манометр.

$$p_1 - p_2 = h(\gamma - \gamma_1), \tag{2. 5}$$

где p_1 и p_2 — давления, подводимые к манометру, причем $p_1 > p_2$;
γ — удельный вес рабочей жидкости в дифманометре;
γ_1 — удельный вес жидкости, находящейся над рабочей жидкостью в дифманометре.

Разновидностью U-образного манометра является **чашечный манометр**, у которого одно из колен трубки заменено широким невысоким сосудом рис. 2.3. Измеряемое давление подводится к отверстию в широком сосуде *1*. Тонкая трубка *2* сообщена в нижней части с сосудом, верхний конец трубки открыт. Шкалу *3* устанавливают так, чтобы при отсутствии давления ее нулевое деление находилось на уровне жидкости в тонкой трубке. При увеличении давления жид-

кость из широкого сосуда перетекает в трубку. Отсчитывают показания по высоте уровня жидкости в тонкой трубке.

Вследствие перетока жидкости в трубку уровень в сосуде понижается, что приводит к смещению нулевой точки и, следовательно, к ошибке в показаниях. Однако из-за малого сечения трубки и большой площади сосуда эта ошибка незначительная и ею можно пренебречь. При точных измерениях вводят соответствующую поправку.

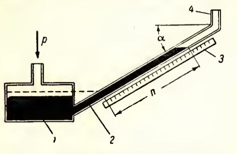


Рис. 2. 4. Микроманометр с наклонной трубкой.

1 — сосуд; *2* — наклонная трубка; *3* — шкала; *4* — открытый конец трубки.

Величину давления p, измеренную чашечным манометром, определяют по формуле

$$p = h\gamma\left(1 + \frac{s}{S}\right), \qquad (2.6)$$

где s — площадь отверстия трубки;
S — площадь сечения сосуда;
h — высота столба жидкости, отсчитанная от нулевого деления шкалы;
γ — удельный вес жидкости.

Ошибку в показаниях, определяемую как разность между высотой действительного избыточного столба жидкости H и высотой h, отсчитанной от нулевого деления шкалы, определяют по формуле

$$H - h = h\frac{s}{S}. \qquad (2.7)$$

При $h = 760$ *мм*, $d = 3$ *мм*, $D = 100$ *мм* эта ошибка в показаниях составит около 0,7 *мм*. Здесь d — диаметр трубки и D — диаметр сосуда.

Для измерения малых избыточных давлений и разрежений применяют микроманометр с наклонной трубкой (рис. 2. 4). Показания отсчитывают по шкале в *мм*, расположенной вдоль наклонной трубки; они могут быть пересчитаны в величину давления по формуле (при малом отношении площади сечения трубки к сечению сосуда)

$$p = n\gamma\sin\alpha, \qquad (2.8)$$

где n — показания по шкале;
γ — удельный вес жидкости;
α — угол наклона трубки.

Наклон трубки увеличивает перемещение жидкости при изменении давления, что облегчает отсчет.

Эти приборы заполняют обычно подкрашенной водой или спиртом и применяют для измерения тяги в печах, поэтому их называют еще

тягомерами. Если измеряемое давление ниже атмосферного, то его подводят к правому концу наклонной трубки, и тогда прибор показывает разрежение.

Абсолютное давление ниже атмосферного в *мм рт. ст.* измеряют ртутным вакуумметром (рис. 2. 5), называемым еще укороченным барометром. Левый конец трубки запаян, к открытому правому подводят измеряемое давление $p_{изм}$. Трубка заполнена ртутью. Если правый конец трубки сообщен с атмосферой, то ртуть занимает положение, показанное на рис. 2.5, *а*. Если над ртутью в правом колене будет создано разрежение, то при $p_{изм} < h_1$ ртуть в левом колене опустится, а в правом повысится. Разность высот столбов ртути h определяет величину измеряемого давления. Верхний предел измерения определяется высотой h_1.

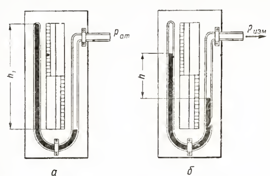


Рис. 2. 5. Ртутный вакуумметр.

а — сообщен с атмосферой; *б* — сообщен с измеряемым давлением. $p_{ат}$ — атмосферное давление; $p_{изм}$ — измеряемое давление ниже атмосферного.

Погрешности жидкостных манометров возникают главным образом при отсчете показаний. При цене деления шкалы в 1 *мм* визуально трудно отсчитать с точностью до 0,25 *мм*. Если отсчитывают по двум трубкам, то погрешность возрастает до 0,5 *мм*.

Относительная погрешность зависит от величины измеряемого давления: чем она больше, тем погрешность меньше.

При точных измерениях в показания жидкостных манометров вносят поправки на изменение веса жидкости от изменения силы тяжести при перемене места измерения, на изменение температуры манометра, на капиллярные явления (для однотрубных приборов) и некоторые другие. Жидкостные U-образные манометры с ртутным заполнением используются как образцовые при поверках манометров других типов.

К числу жидкостных приборов относятся еще кольцевые весы и колокольный манометр.

Кольцевые весы, предназначенные для измерения небольших давлений и перепадов давления (рис. 2. 6), состоят из полого кольца с перекладиной, покоящейся на опоре *7*. В верхней части кольцо разделено глухой перегородкой. Полость кольца до половины заполнена жидкостью.

К штуцерам *3* и *5* подводятся давления, разность которых требуется определить. При $p_1 > p_2$ сила, действующая на перегородку

слева, будет больше силы, действующей справа. Это образует вращающий момент, и кольцо будет поворачиваться по часовой стрелке. Но одновременно увеличивается противоположно направленный вращающий момент от действия груза *1*. В результате каждому значению измеряемого перепада будет соответствовать определенный угол поворота кольца.

Жидкость в кольце является гидравлическим затвором. При измерениях разность давлений ($p_1 - p_2$) уравновешивается гидростатическим давлением столба жидкости высотой h.

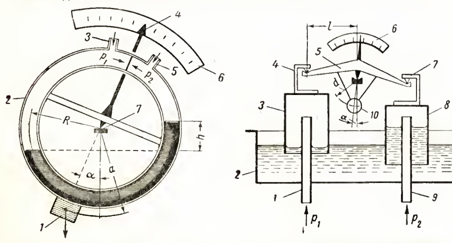


Рис. 2. 6. Кольцевые весы.

1 — груз; *2* — кольцо; *3* и *5* — штуцера для подвода давления; *4* — указатель; *6* — шкала; *7* — опора кольца.

Рис. 2. 7. Колокольный манометр.

1 и *9* — трубки для подвода давления; *2* — сосуд с жидкостью; *3* и *8* — колоколы; *4* и *7* — подвески сосудов; *5* — коромысло; *6* — шкала; *10* — груз.

Измеряемая разность давлений при равновесии кольца определяется уравнением

$$p_1 - p_2 = \frac{Ga}{Rf} \sin \alpha, \tag{2. 9}$$

где α — угол поворота кольца;

f — площадь внутреннего сечения кольца;

R — средний радиус кольца;

G — вес груза;

a — расстояние от центра кольца до центра тяжести груза.

Если p_2 равно атмосферному давлению, то прибор измеряет избыточное давление p_1.

Как видно из уравнения (2. 12), на показания прибора не влияют количество и удельный вес жидкости в кольце.

Трубки, подводящие давление к кольцу, не должны мешать его вращению, для чего их делают тонкими и вблизи прибора свивают

в несколько витков. При малых давлениях применяют гибкие резиновые трубки.

Колокольный манометр (рис. 2.7) применяют обычно для измерения разности двух давлений ниже атмосферного, например в дымоходах печей, котлов и т. п. Поэтому их называют также тягомерами. Два одинаковых колокола *3* и *8* подвешены к коромыслу *5*. Нижние концы их погружены в жидкость. По трубкам *1* и *9* подводятся измеряемые давления под колоколы. Если $p_1 > p_2$, то левый колокол поднимается, а правый опускается под действием разности моментов вращения. Поворот коромысла уравновешивается противоположным моментом вращения от действия груза *10*. При равновесии измеряемая разность давления определяется по уравнению

$$p_1 - p_2 = \frac{Gd}{fl} \sin \alpha, \qquad (2.10)$$

где G — вес груза;
d — расстояние от точки опоры коромысла до центра тяжести груза;
f — площадь сечения колокола;
l — плечо коромысла;
α — угол поворота коромысла.

§ 3. ГРУЗОПОРШНЕВЫЕ МАНОМЕТРЫ

Грузопоршневыми манометрами называют приборы, которыми можно создать и измерить высокое давление при помощи поршня с грузами, воздействующими на замкнутый объем жидкости. Грузопоршневые манометры являются наиболее точными приборами и широко применяются для поверки других видов манометров. Погрешность их составляет 0,01—0,2% от измеряемого давления.

Грузопоршневой манометр (рис. 2.8), используемый для поверки пружинных манометров, состоит из прочного металлического корпуса *1*, прикрепленного к монтажной доске, колонки *7* и поршня *6*. Каналы в корпусе и его ответвления заполняются легким минеральным маслом. Поршень и отверстие в колонке, в которое он вставлен, очень точно пригоняются путем тщательной обработки и шлифовки. Поршень легко может перемещаться в отверстии, при этом сохраняется полная герметичность колонки. Давление масла внутри каналов определяется весом поршня и грузов:

$$p = \frac{G}{S}, \qquad (2.11)$$

где p — давление;
G — вес поршня и грузов;
S — рабочая площадь поршня.

Обычно поршень изготовляют площадью, равной 1 *см²*; тогда давление в *кГ/см²* соответствует весу поршня и грузов в килограммах.

Наибольшее давление, которое создается грузами в таких манометрах, не превышает 50 *кГ/см²*.

Поршневым прессом *2* давление масла можно повысить до 500 *кГ/см²*. При этом колонка с поршнем *6* отключается перекрытием игольчатого вентиля. Для измерения давления при отключении поршня требуется дополнительный манометр, для установки которого предусмотрен правый верхний штуцер.

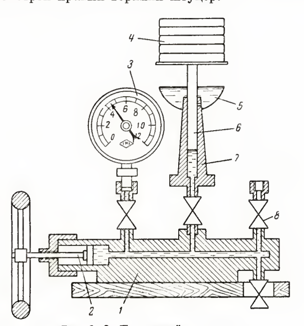


Рис. 2. 8. Поршневой манометр.

1 — корпус; *2* — поршневой пресс; *3* — поверяемый манометр; *4* — грузы; *5* — чашка с маслом; *6* — поршень; *7* — колонка; *8* — вентиль.

Поршневой пресс используется также для удобства заполнения каналов маслом и удаления из них воздуха.

Существуют грузопоршневые манометры с малой рабочей площадью поршня (0,05 *см²*), которыми при помощи груза в 100 *кг* можно создать давление 2000 *кГ/см²*. Для создания и измерения еще более высоких давлений имеются специальные грузопоршневые манометры. На рис. 2. 9 приведена схема манометра с измерительным мультипликатором М. К. Жоховского, которым можно измерить давление до 10 000 *кГ/см²*.

В верхней части над поршнем *2* низкого давления установлена колонка *1* поршневого манометра, описанного выше, для создания давления до 50 *кГ/см²*. Поршень *2* через шаровую опору прижат

к поршню *3* высокого давления. Во время измерения поршни *2* и *3* для устранения влияния сил трения приводятся во вращение электродвигателем (на рисунке показан) через шкив. Измеряемое давление по трубке подводится в полость под поршнем *3* и стремится вытолкнуть его вверх. Но это выталкивающее усилие уравновешивается силой, действующей на поршень *2* от давления, создаваемого поршневым манометром.

При равновесии

$$ps = p's' + G, \qquad (2.12)$$

где p — измеряемое давление;

p' — давление масла над поршнем *2*;

s — площадь поршня *3* высокого давления;

s' — площадь поршня *2* низкого давления;

G — вес поршней *2* и *3*.

Отсюда

$$p = p'\frac{s'}{s} + \frac{G}{s}. \qquad (2.13)$$

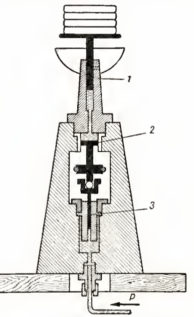


Рис. 2. 9. Поршневой манометр с измерительным мультипликатором М. К. Жоховского.

Как видно, давление p больше давления p' во столько раз, во сколько площадь поршня *2* больше площади поршня *3* (G/s для данного манометра величина постоянная и незначительная по сравнению с p).

Недостаток грузопоршневых манометров: ими нельзя измерять непрерывно изменяющееся давление в достаточно широких пределах.

Малая погрешность грузопоршневых манометров достигается изготовлением поршня и отверстия в колонке заданных размеров с высокой точностью.

§ 4. ПРУЖИННЫЕ МАНОМЕТРЫ

Пружинные манометры являются наиболее распространенными приборами для измерения давления в производственных условиях. Они имеют основную допустимую погрешность порядка $\pm 1{,}5 \div 2{,}5\%$ от верхнего предела измерения. Наиболее распространен манометр с одновитковой трубчатой пружиной или, как его называли ранее, с трубкой Бурдона по имени ее изобретателя (рис. 2.10 *а*). Главной деталью манометра является трубчатая пружина *1* овального сечения (рис. 2.10, *б*). Один конец ее неподвижно прикреплен к штуцеру,

по которому во внутреннюю полость подается измеряемое давление. Другой — глухой — конец пружины свободен и тягой связан с зубчатым сектором *2*, находящимся в зацеплении с шестерней, на оси которой укреплена стрелка *3*. При увеличении давления внутри трубчатой пружины она стремится развернуться и ее свободный конец перемещается вверх (рис. 2. 11). Это вызывает перемещение стрелки в сторону увеличения показаний.

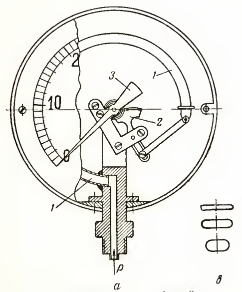


Рис. 2. 10. Манометр с трубчатой пружиной.

а — устройство манометра; б — сечения трубчатых пружин

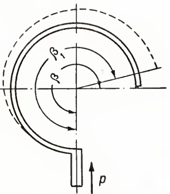


Рис. 2. 11. Деформация трубчатой пружины от действия давления.

Угол раскручивания пружины определяют по уравнению

$$\beta - \beta_1 = \frac{x}{b}\beta, \tag{2.14}$$

где β — угол до раскручивания пружины;
β_1 — угол после раскручивания пружины;
b — длина малой оси эллиптической трубчатой пружины;
x — приращение длины малой оси трубчатой пружины от действия давления.

Чем меньше малая ось b, т. е. чем более сплющена трубка, тем больше угол раскручивания. Величина x зависит от материала и толщины стенок трубки.

Трубчатая пружина делается достаточно прочной, чтобы вызываемые давления перемещения ее свободного конца находились в пределах упругих деформаций. Для небольших пределов измерения пружину изготовляют из тонкой латуни, и она имеет сильно сплющенный вид. Для более высоких давлений пружины изготовляют из

стали, овальность их уменьшают, а толщину стенок увеличивают. Перемещение свободного конца пружины составляет от 2 до 15 *мм* в зависимости от размера трубки.

В настоящее время манометры с трубчатой пружиной изготовляют различными по размеру для корпусов диаметром от 50 до 350 *мм* и на пределы измерения от 0,5 до 10 000 *кГ/см*².

Манометрами с трубчатой пружиной измеряют и разрежение. Шкала вакуумметра имеет нуль справа. Изготовляют также мановакуумметры, которыми измеряют как разрежение, так и избыточное давление. Нуль шкалы мановакуумметра расположен посредине шкалы.

Трубчатую пружину выбирают достаточно прочной, чтобы при непредвиденных превышениях верхнего предела давления она не выходила быстро из строя. Как правило, при измерениях нельзя допускать перегрузки манометра. Рабочее давление должно составлять примерно $^2/_3$ от верхнего предела.

Имеются образцовые манометры с трубчатой пружиной класса точности 0,25 и 0,35, которыми поверяют технические манометры.

Другим распространенным видом является манометр с многовитковой трубчатой пружиной, называемой еще геликсом. Такие манометры изготовляют обычно как самопишущие (рис. 2. 12). Многовитковая пружина состоит как бы из нескольких обычных трубчатых пружин, соединенных последовательно. Этим достигается значительный угол раскручивания ее свободного конца (45—50°).

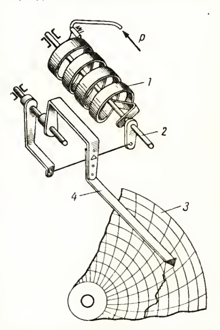


Рис. 2. 12. Схема самопишущего манометра с многовитковой трубчатой пружиной.

Один конец многовитковой пружины *1* закреплен неподвижно и к нему подводится измеряемое давление. Второй свободный конец прикреплен к скобе оси *2*. При увеличении давления свободный конец пружины поворачивает ось, а вместе с ней и тягу, которая перемещает стрелку *4* с пишущим пером по диаграмме *3*. Диаграмма — бумажный диск, вращаемый часовым механизмом или электродвигателем (на рисунке не показан). Концентрические окружности — деления шкалы в *кГ/см*², радиальные дуги — время суток. Обычно диаграмма совершает один оборот в сутки, после чего ее меняют.

При изменении давления перо, заполненное чернилами, вычерчивает кривую на диаграмме.

Манометры с многовитковой пружиной изготовляют на разные пределы измерения до 160 *кГ/см²*, класс точности их 1,5. Изготовляют манометры с многовитковой трубчатой пружиной, представляющей собой концентрическую спираль.

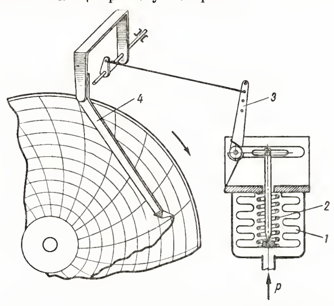


Рис. 2. 13. Схема самопишущего сильфонного манометра.
1 — сильфон; *2* — пружина; *3* — рычаг; *4* — стрелка с пером.

На рис. 2.13 показана схема также широко распространенного промышленного прибора для измерения давления — сильфонного манометра. Название это происходит от слова сильфон, означающее гармониковую цилиндрическую мембрану. В отличие от трубчатых пружин, описанных выше, сильфон *1* в этом манометре не является упругим элементом, он лишь представляет собой эластичную перегородку между полостью с измеряемым давлением и окружающей средой. Упругие свойства сильфона сравнительно малы. Упругим элементом в этом приборе является цилиндрическая пружина *2*, подбором которой устанавливают пределы измерения. Как видно из рисунка, под действием измеряемого давления сильфон и пружина сжимаются и через рычаг *3* и систему тяг перемещают стрелку по диаграмме. Сильфонными манометрами измеряют давление до 6 *кГ/см²*. Они имеют класс точности 1,5. По аналогичной схеме изготовляют сильфонные вакуумметры и мановакуумметры класса точности 2,5.

Иногда (сравнительно редко) в промышленных условиях применяют манометры с плоской мембраной в качестве упругого элемента (рис. 2. 14). Они используются для измерения давления очень вязких сред, так как по сравнению с манометрами других видов они менее подвержены загрязнению и закупорке подводящих каналов.

Мембраны изготовляют из медных сплавов и из стали. Мембранными манометрами измеряют давление от 0,2 до 30 *кГ/см*², их класс точности 2,5—4.

Для измерения небольших давлений и разрежений в пределах от нескольких *мм вод. ст.* до ±800 *мм вод. ст.* служат мембранные тягонапоромеры (рис. 2. 15). Чувствительным элементом является мембранная коробка *1*, нагруженная плоской пружиной *2*. Класс точности этих приборов 2,5.

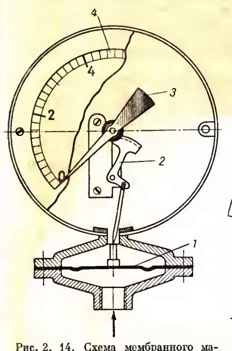


Рис. 2. 14. Схема мембранного манометра.

1 — мембрана; *2* — зубчатый сектор; *3* — стрелка; *4* — шкала.

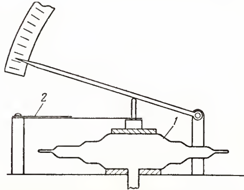


Рис. 2. 15. Схема мембранного тягонапоромера.

Большое распространение получили манометры с пневматической телепередачей показаний. В этих приборах измеряемое давление преобразуется в пропорциональное ему давление сжатого воздуха. Изменению измеряемого давления от нижнего до верхнего пределов шкалы соответствует изменение давления воздуха в пределах от 0,2 до 1 *кГ/см*².

Манометр с телепередачей состоит из двух отдельных приборов — пневмодатчика и вторичного прибора. Измеряемое давление преобразуется в давление сжатого воздуха в датчике. От датчика к вторичному

прибору прокладывают трубку небольшого диаметра. Вторичный прибор представляет собой самопишущий или показывающий манометр (обычно сильфонный) с пределами измерения от 0,2 до 1 *кГ/см²*. На шкале вторичного прибора нанесены деления, соответствующие пределам измерения датчика, в *кГ/см²*.

Датчик — обычно показывающий манометр с многовитковой пружиной (может быть и с сильфоном, с одновитковой пружиной) — имеет дополнительное пневмоустройство (рис. 2. 16). Многовитковая пружина, измеряющая давление, перемещает стрелку по шкале и одновременно через тягу *1* воздействует на пневматическое устройство.

Пневматическое устройство питается по трубке *10* сжатым воздухом, проходящим через фильтр *11* и редуктор *12*, которым поддерживается строго постоянное давление, равное 1,1 *кГ/см²*.

Давление питания измеряется манометром *14*. Часть воздуха из линии питания через постоянный дроссель *13* и полость над сильфонами *20* поступает к соплу *8*. Другая основная часть воздуха поступает к входному соплу *15*. Постоянный дроссель представляет собой трубку диаметром 0,2 *мм* небольшой длины. Сопло *8* имеет отверстие диаметром около 0,4 *мм*, через которое воздух выходит в атмосферу. Вблизи сопла *8* расположена заслонка *6*, положение которой зависит от величины измеряемого давления.

Тяга *1* шарнирно соединена с рычагом *2*. К оси *3* рычага *2* жестко прикреплен рычаг *5* с поводком *7*, воздействующим на заслонку *6*. При увеличении измеряемого давления рычаг *2* поворачивается против часовой стрелки и заслонка *6* приближается к соплу; при уменьшении давления заслонка отводится от сопла. Рычаг *4*, через который свободно пропущена ось *3*, не препятствует ее вращению.

Когда заслонка не прикрывает сопло, то весь воздух, проходящий через дроссель *13*, свободно выходит через сопло *8* в атмосферу и давление над сильфонами *20* не повышается. Сопло *15* закрыто клапаном *17*, а сопло *16* сообщено с атмосферой. Если же заслонка прикрывает сопло, то давление воздуха после дросселя и над сильфонами *20* возрастает. От этого сильфоны *20* сжимаются и перемещают тарельчатый клапан *17* вниз. При этом открывается сопло *15* и закрывается сопло *16*, воздух устремляется по трубке *19* к вторичному прибору и в камеру сильфона *9*. Давление воздуха на выходе показывает манометр *18*. Таким образом, когда заслонка *6* не прикрывает сопла *8*, давление на выходе равно нулю. Прикрытие заслонки вызывает повышение выходного давления, и при полном закрытии оно достигает максимума 1 *кГ/см²*.

Соотношение площадей внутреннего и наружного сильфонов *20* подобрано таким, что когда давление воздуха над сильфонами (и в трубке сопла *8*) повышается до 0,25 *кГ/см²*, давление на выходе (в трубке *19*) повышается до 1 *кГ/см²*. Вследствие такого действия узел пневматического устройства, включающего детали *13—19*, на-

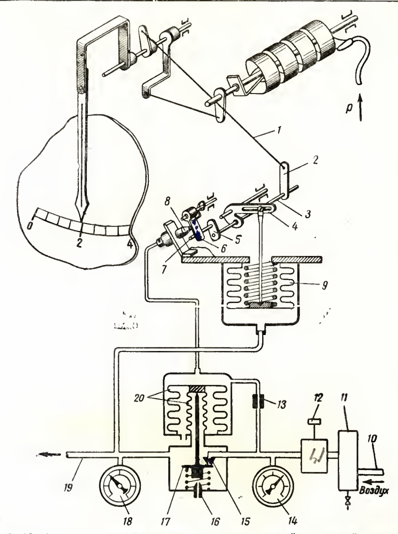


Рис. 2. 16. Схема датчика манометра с пневматической передачей показаний. 1 — тяга; 2, 4, 5 — рычаги; 3 — ось; 6 — заслонка; 7 — поводок заслонки; 8 — сопло; 9 — сильфон обратной связи; 10 — трубка подвода воздуха; 11 — фильтр воздуха; 12 — редуктор давления; 13 — постоянный дроссель; 14 и 18 — манометры; 15 — входное сопло; 16 — выходное сопло; 17 — тарельчатый клапан; 19 — трубка; 20 — сильфоны.

зывается усилителем. В практике его называют еще вторичным реле. Такое усилительное действие позволяет работать системе сопло — заслонка при небольших давлениях сжатого воздуха, чем устраняется действие струи воздуха на заслонку.

Для пропорционального изменения положения заслонки, а следовательно, и выходного давления предназначен сильфон *9*, назы-

ваемый сильфоном обратной связи. Действие его протекает следующим образом. При увеличении измеряемого давления заслонка приближается к соплу и выходное давление повышается. Это вызывает сжатие сильфона *9* и поворот рычага *4* против часовой стрелки. Нижний конец рычага *4* перемещает ось *3* вместе с рычагами *5* и *2* вправо и отводит заслонку от сопла. Из рисунка видно, что когда измеряемое давление уменьшается и заслонка отводится от сопла, действием сильфона *9* она снова приближается к соплу. В результате противоположного действия обратной связи, которое протекает практически одновременно с действием на заслонку со стороны измеряемого давления, приближение или отвод заслонки происходит постепенно. Полный ход заслонка совершает лишь при изменении измеряемого давления от нижнего до верхнего предела измерения.

Вторичный прибор можно располагать на расстоянии до 150 *м* от датчика. При бо́льших расстояниях сопротивление трубок вносит дополнительные погрешности в показания.

Для измерения давления и передачи показаний на расстояние во взрывобезопасных помещениях технологических установок применяют манометры с электрической системой передачи. Комплект состоит из датчика и вторичного прибора (рис. 2. 17). Измеряемое давление по трубке подводится к датчику с многовитковой трубчатой пружиной *1*. Вторичный прибор, соединенный с датчиком тремя электрическими проводами, можно устанавливать на расстоянии до 600 *м*. Электрическая схема представляет собой самоуравновешивающийся мост переменного тока, четыре плеча которого образуют индукционные катушки с подвижными сердечниками. Два плеча моста, катушки A и B расположены в датчике, а две другие катушки C и D во вторичном приборе. Мост питается переменным током частотой 50 *гц*, напряжением 127 *в*.

Сердечник *2* катушек датчика уравновешен грузом и перемещается манометрической пружиной при изменениях измеряемого давления. Сердечник *3* катушек вторичного прибора перемещается автоматически от действия магнитных катушек C и D при небалансе моста и повторяет перемещения сердечника датчика, он уравновешен грузом для устранения влияния веса и может оставаться в покое в любом положении в пределах рабочего хода.

При среднем положении сердечников полные сопротивления всех катушек одинаковы и мост находится в равновесии, потенциалы в точках e и f равны и ток в среднем проводе отсутствует. При увеличении давления сердечник *2* приподнимается. От этого индуктивное сопротивление катушки A увеличится, а катушки B уменьшится. Между точками e и f возникнет разность потенциалов, и появится ток в среднем проводе. Этот ток увеличит общий ток в катушке C. Магнитное поле катушки C увеличится, и сердечник *3* приподнимется. Как только сердечник *3* займет такое же положение относи-

тельно катушек, как и сердечник *2*, равновесие моста восстановится и ток в среднем проводе уменьшится практически до нуля.

Описанная схема проста и благодаря достаточно большой мощности катушек для восстановления равновесия моста не требуется какого-либо другого двигателя. На работу схемы не влияют колебания напряжения питания в пределах ±5%. Класс точности манометров с электропередачей 2,5.

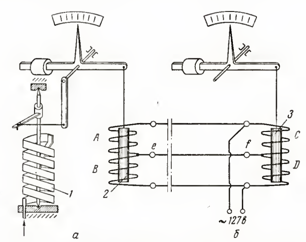


Рис. 2. 17. Схема манометра с электрической системой передачи показаний.

а — датчик; *б* — вторичный прибор.

Существует несколько разновидностей схемы электрической передачи. Имеются схемы индукционного моста с низким напряжением питания (около 7 *в*), в которых небаланс обнаруживается и усиливается электронным усилителем, для восстановления баланса моста применяется реверсивный электродвигатель, перемещающий сердечник катушек вторичного прибора. Имеются схемы с реостатным датчиком.

Системы электрической передачи показаний применяются и с манометрами, имеющими одновитковую трубчатую пружину или сильфон.

Во многих схемах автоматики требуется получить сигнал о недопустимом повышении или понижении давления для предупреждения аварии. Для этого применяют электроконтактные манометры. Контакты их замыкают электрическую цепь через стрелку при понижении или повышении давления. Обычно эти контакты можно вручную устанавливать на заданные значения давления в пределах шкалы. Схема такого манометра с одновитковой трубчатой пружиной

приведена на рис. 2. 18. В электрическую цепь контактов включают сигнальную лампу или звуковой сигнал (звонок или сирену).

Существует большое количество манометров специального назначения. Для измерения высокого давления газов в баллонах, требующих соблюдения определенных мер предосторожности при обращении с ними, применяют манометры, предназначенные только для одного какого-либо газа. Например, есть кислородные манометры для измерения давления кислорода. Их корпус окрашен в голубой цвет, на шкале имеется надпись «Кислородный». Применять

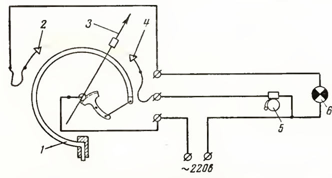


Рис. 2. 18. Схема электроконтактного манометра с одновитковой трубчатой пружиной.

1 — трубчатая пружина манометра; 2 — контакт нижнего предела; 3 — стрелка манометра; 4 — контакт верхнего предела; 5 — электрический звонок; 6 — сигнальная лампа.

другие манометры для измерения давления кислорода воспрещается. Объясняется это тем, что внутренние детали кислородного манометра должны тщательно оберегаться от попадания в них масла, наличие которого при соприкосновении с кислородом может привести к самовозгоранию и к аварии.

Имеются манометры ацетиленовые, окрашенные в белый цвет; водородные — в темно-зеленый; аммиачные — в желтый.

Ацетилен при соприкосновении с медью образует взрывоопасную ацетиленовую медь, поэтому детали ацетиленового манометра должны быть стальными или из сплавов с небольшим содержанием меди. Аммиак также разрушает медные сплавы из-за сильного коррозионного действия, поэтому детали аммиачных манометров, соприкасающихся с газом, изготовляют из нержавеющей стали. Вредное действие водорода состоит в явлении так называемой водородной коррозии, и для изготовления манометров применяют специальные сорта стали. Условная окраска манометров и дополнительные надписи на них напоминают о необходимости правильного применения их и соблюдения мер предосторожности.

§ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАНОМЕТРЫ

Для измерения высоких давлений применяют манометры сопротивления, в которых используется свойство проводников изменять сопротивление от действия давления. Зависимость эта выражается уравнением

$$\Delta R = kRp, \tag{2.15}$$

где ΔR — приращение сопротивления;

R — начальное сопротивление;

k — коэффициент давления или пьезокоэффициент;

p — давление.

Величина k характеризует приращение сопротивления проводника сопротивлением в 1 *ом* от изменения давления в 1 $кГ/см^2$. В качестве проводника используют манганин, его сопротивление почти не изменяется от температуры. Для манганина величина k лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-6}$ до $2{,}3 \cdot 10^{-6}$ $см^2/кГ$.

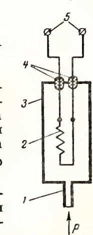


Рис. 2. 19. Схема датчика манганинового манометра М. К. Жоховского.

1 — штуцер для подвода давления; 2 — катушка из манганиновой проволоки; 3 — корпус манометра; 4 — герметичные выводы электропроводов; 5 — клеммы для подключения внешних проводов.

На рис. 2. 19 показана схема датчика манганинового манометра М. К. Жоховского, которым можно измерять давления до 30 000 $кГ/см^2$ с погрешностью $\pm 1{,}0\%$. Корпус манометра изготовляют стальным, достаточно прочным, чтобы он мог выдержать высокое давление.

Датчик включается в одно из плеч моста Уитсона, собранного в приборе электрического действия, шкала которого гидрадуируется в $кГ/см^2$.

Существуют электрические манометры, в которых используется пьезоэлектрический эффект кварца и некоторых других материалов. Известно, что если кварцевую пластинку сжимать вдоль электрической оси, то на ее плоскостях возникают равные, но противоположные по знаку заряды, величина которых выражается уравнением

$$q = kF, \tag{2.16}$$

где q — электрический заряд;

F — сила, приложенная к пластинке;

k — пьезоэлектрическая постоянная; для кварца $k = 2{,}1 \times 10^{-11}$ $к/кГ$.

Знак зарядов зависит от того, сжимается или разжимается пластинка. Схема датчика пьезокварцевого манометра показана на рис. 2. 20. Датчик подключается к электрическому прибору, шкала которого

градуируется в *кГ/см*². Пьезокварцевые манометры почти безынерционные, особенно пригодны для измерения быстро изменяющихся давлений при исследованиях различных взрывных процессов и т. п. Пределы измерения такого манометра достигают сотен *кГ/см*² и зависят от прочности датчика.

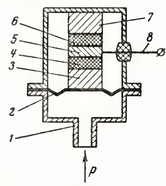


Рис. 2. 20. Схема пьезокварцевого манометра.

1 — штуцер для подвода давления; 2 — металлическая мембрана; 3 и 7 — металлические вкладыши; 4 и 6 — кварцевые пластинки; 5 — металлическая пластинка; 8 — изолированный электрический вывод.

Для измерения высоких давлений применяют также манометры емкостные и индукционные. В первых используется изменение емкости конденсатора, а во вторых индуктивности катушки от прогибания упругой мембраны под действием давления (рис. 2. 21). Емкостные датчики называют мессдозами. Ими измеряют давление в деталях механизмов, например давление металла на валки прокатного стана и т. п.

Можно измерять давление при помощи т е н з о м а н о м е т р о в, использующих проволочные т е н з о д а т ч и к и, которые применяются для измерения механических напряжений и упругих деформаций в металлических деталях и конструкциях машин и сооружений.

Тензодатчик (рис. 2. 22) представляет собой тонкую проволоку, уложенную петлеобразно между двумя склеенными между собой слоями тонкой бумаги. Длину элемента предусматривают различной,

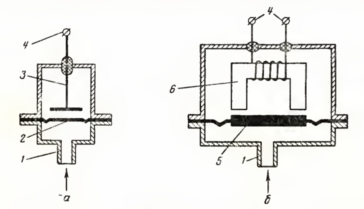


Рис. 2. 21. Схемы емкостного (*а*) и индукционного (*б*) датчиков давления.

1 — штуцер для подвода давления; 2 — мембрана; 3 — электрод; 4 — клеммы для подключения проводов; 5 — мембрана с железным сердечником; 6 — индукционная катушка с железным сердечником.

обычно около 30—40 *мм*; электрическое сопротивление около 200—300 *ом* при диаметре проволоки около 0,03 *мм*.

Проволоку обычно берут константановую (сплав 45% Ni и 55% Cu), как имеющую малый температурный коэффициент и достаточно высокое сопротивление.

Для измерения давления тензодатчик наклеивают на поверхность металла какого-либо упругого элемента: трубку, мембрану и т. п. При деформации упругого элемента под действием давления проволока тензодатчика растягивается, ее сечение уменьшается и сопротивление увеличивается. Тензодатчик включается в схему электрического моста для измерения сопротивления, шкала которого градуируется в единицах давления. Схема устройства одного из тензоманометров показана на рис. 2. 23. Упругим элементом является трубка *3*, на наружную поверхность которой наклеен активный тензодатчик, воспринимающий деформацию стенок трубки от давления. К верхнему глухому концу трубки приклеен второй такой же тензодатчик, не подвергающийся деформации. Он служит для компенсации изменений сопротивления активного датчика при колебаниях температуры стенок трубки. Оба датчика образуют плечи моста сопротивления и при помощи электрических проводов подсоединяются к измерительному прибору (на схеме не показан).

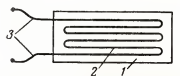


Рис. 2. 22. Проволочный тензодатчик.

1 — бумага; *2* — проволока; *3* — выводы.

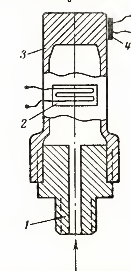


Рис. 2. 23. Схема тензоманометра.

1 — штуцер для подвода давления; *2* — активный тензодатчик; *3* — трубка; *4* — компенсационный тензодатчик.

Основной характеристикой тензодатчика является тензочувствительность S:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}, \tag{2.17}$$

где ΔR — приращение сопротивления датчика;
R — сопротивление датчика до деформации;
ΔL — приращение длины датчика при деформации;
L — длина датчика до деформации.

Упругий элемент, измеряющий давление, должен быть достаточно прочным, чтобы его деформация была упругой и тем самым обеспечивался бы точный возврат к начальному состоянию его линейных размеров. Это в одинаковой мере относится и к деформации самого тензодатчика, так как в противном случае прибор не обеспечит повторяемости показаний, постоянства точки нуля и точности измерений. Допустимая деформация датчика $\Delta L/L$ не должна превышать 10^{-2}, что гарантирует его от остаточных деформаций.

Наклеивают тензодатчики на металлические поверхности специальными клеями (карбинольным, клеем БФ и др.).

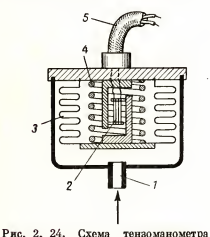


Рис. 2. 24. Схема тензоманометра с ненаклеенным тензодатчиком.

1 — подвод давления; *2* — тензодатчик; *3* — сильфон; *4* — пружина; *5* — электропровода.

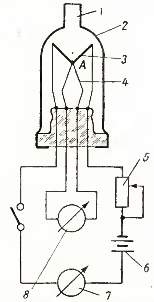


Рис. 2. 25. Схема термопарного манометра.

1 — трубка для подключения к вакуумной системе; *2* — манометрическая лампа; *3* — подогревная нить; *4* — термопара; *5* — реостат; *6* — источник тока; *7* — миллиамперметр; *8* — милливольтметр со шкалой в *мм рт. ст.*

Имеются так называемые ненаклеенные или свободные тензодатчики (рис. 2. 24). В них проволока тензоэлемента намотана на две опоры, перемещающиеся относительно друг друга под действием давления.

Тензоманометрами измеряют как небольшие избыточные давления, так и высокие. Верхний предел измерения ограничивается лишь трудностями создания достаточно прочных конструкций упругих элементов. Однако, как и все электрические манометры, тензоманометры для измерения давлений на промышленных технологических установках применяются пока редко.

Особо важное значение получили электрические приборы для измерения глубокого вакуума. Распространенным прибором является термопарный манометр (рис. 2. 25). Датчиком служит манометрическая лампа *2*, похожая на обычную электронную лампу. Лампа имеет трубку *1*, припаиваемую к системе, в которой измеряется давление. Внутри баллона лампы расположена подогревная нить *3*. В точке *A* нити приварена термопара *4*. Нить питается постоянным током источника *6*, величина которого регулируется реостатом *5* и контролируется миллиамперметром *7*.

Действие термопарного манометра основано на зависимости теплопроводности газа от давления. Тепло, выделяемое током в подогревной нити, через газ передается стенкам баллона лампы, от которых оно излучается в окружающую среду. При постоянной величине тока питания подогревной нити и при неизменном давлении внутри баллона лампы создается тепловое равновесие между притоком и расходом тепла и температура нити принимает постоянное значение. Эта температура измеряется небольшой термопарой *4*, приваренной к нити в точке *A*, э. д. с. которой измеряется милливольтметром *8*. Если в баллоне лампы давление уменьшится, то теплопроводность оставшегося газа уменьшится и тепловое равновесие нарушится, количество тепла, передаваемого от нити к стенкам баллона, уменьшится и температура нити повысится. Это вызовет увеличение э. д. с. термопары и показаний милливольтметра. Увеличение давления в баллоне вызовет уменьшение температуры нити и показаний милливольтметра. Термопарным манометром измеряют давление от 0,1—0,2 до 10^{-3} *мм рт. ст.*

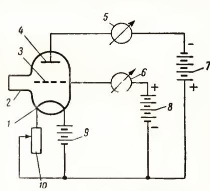


Рис. 2. 26. Схема ионизационного манометра.

1 — катод; *2* — трубка для подключения к вакуумной системе; *3* — сетка; *4* — коллектор ионов; *5* — прибор для измерения ионного тока; *6* — прибор для измерения электронного тока; *7*, *8* и *9* — источники питания; *10* — реостат.

Для измерения еще более низких давлений применяют ионизационные манометры, действие которых основано на явлении ионизации остаточного газа и измерении ионного тока. Датчиком ионизационного манометра также является специальная лампа (рис. 2. 26), имеющая трубку *2* для подсоединения к вакуумной системе. Лампа имеет три электрода: катод в виде вольфрамовой нити накала, сетку *3* и коллектор ионов *4*. На сетку подается положительный потенциал относительно катода от источника постоянного тока *8*, а на коллектор ионов отрицательный потенциал от источника *7*.

Эмитируемые накаленным катодом электроны устремляются на сетку и образуют в ее цепи электронный ток. На своем пути электроны сталкиваются с молекулами газа и ионизируют их. Образующиеся при этом положительные ионы устремляются к коллектору ионов, имеющему отрицательный потенциал, и образуют в его цепи ионный ток. При давлениях остаточного газа в лампе менее 10^{-3} *мм рт. ст.* отношение ионного тока к электронному прямо пропорционально давлению:

$$\frac{I_i}{I_e} = kp, \tag{2.18}$$

где I_i — ионный ток;

I_e — электронный ток;

p — давление остаточного газа;

k — коэффициент пропорциональности.

При измерениях электронный ток поддерживают постоянным, и тогда показания прибора зависят только от изменения ионного тока.

Ионный ток предварительно усиливается специальным усилителем и измеряется стрелочным прибором, шкала которого проградуирована в единицах давления.

Ионизационным манометром измеряют давления от 10^{-3} до 10^{-8} *мм рт. ст.* Таким образом, он как бы дополняет термопарный манометр.

Термопарный и ионизационный манометры на установках нефтепереработки и нефтехимии не применяются, но они широко используются в лабораторных приборах, имеющих вакуумные системы (масс-спектрометры, электронные микроскопы и др.).

§ 6. УСТАНОВКА И ПОВЕРКА МАНОМЕТРОВ

Для измерения давления в аппаратах технологических установок в основном применяются пружинные манометры. Жидкостные приборы применяют иногда лишь для измерения тяги в топках печей. Сравнительно редко используются ртутные дифманометры для измерения перепада давления, когда не требуется запись.

Пружинные манометры малоинерционны и быстро реагируют на изменения измеряемого давления. Постоянная времени манометра с одновитковой трубчатой пружиной очень мала и составляет сотые доли секунды. Это требует принятия мер к защите манометров от пульсации измеряемого давления.

Большое число показывающих манометров устанавливают в непосредственной близости к насосам, трубопроводам, аппаратам. Для подключения манометра на трубопроводе или аппарате приваривают стальную бобышку с трубной резьбой диаметром 1/2″. В бобышку ввинчивают стальной патрубок с вентилем. В штуцер вен-

тиля, если давление не пульсирующее, укрепляют манометр (рис. 2. 27). При пульсирующем давлении, горячих продуктах или парах применяют одновитковую сифонную трубку (рис. 2. 27, *б*),

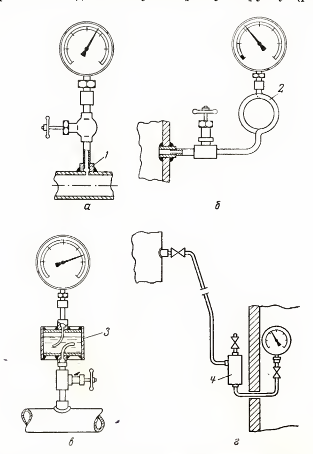


Рис. 2. 27. Способы установки манометров.

а — при непульсирующем давлении и низких температурах среды; *б* — при пульсирующем давлении и высокой температуре среды; *в* — при пульсирующем давлении; *г* — при коррозионных, взрывоопасных и других средах; *1* — бобышка; *2* — сифонная трубка; *3* — глушитель пульсации; *4* — разделительный сосуд.

которая благодаря своему пружинящему действию сглаживает пульсирующий поток. Скапливающаяся в трубке жидкость или конденсат пара охлаждается, чем предохраняется вредное воздействие высокой температуры на механизм манометра. При сильном пульсирующем потоке для предохранения манометра от быстрого механического износа и поломки применяют глушители пульсаций, в которых давле-

ние передается манометру через отверстие малого сечения, длинную тонкую трубку (капилляр) с промежуточным расширительным сосудом или через игольчатый вентиль. Один из глушителей пульсаций показан на рис. 2. 27, *в*. При установке вдали от места измерения между манометром и точкой отбора давления прокладывают стальную манометрическую трубку диаметром $^1/_2''$. Для предохранения от попадания нефтепродукта в помещение, в котором находится манометр, устанавливают разделительный сосуд. Участок трубки от разделительного сосуда до манометра и сам сосуд заполняют негорючей жидкостью, например водой или водным раствором глицерина (рис. 2. 27, *г*). Эту жидкость называют разделительной, она не должна смешиваться с жидкостью или конденсатом паров, давление которых измеряется.

Манометры, измеряющие давление водяного пара, устанавливают часто над трехходовыми кранами. Эти краны позволяют периодически продувать подводящую манометрическую линию без отключения манометра. Для манометров, измеряющих давление нефтепродуктов, установка трехходовых кранов не допускается.

Допустимые предельные погрешности приборов для измерения давления

Прибор	Погрешность
Эталонный поршневой манометр:	
до 50 *кГ/см²*	0,01 (в % от измеряемого давления)
» 250 »	0,02 (в % от измеряемого давления)
» 1000 »	0,03 (в % от измеряемого давления)
Образцовые поршневые манометры 1-го разряда:	
до 50 *кГ/см²*	0,02 (в % от измеряемого давления)
свыше 50 »	0,05 (в % от измеряемого давления)
Образцовые поршневые манометры 2-го разряда:	
до 50 *кГ/см²*	0,05 (в % от измеряемого давления)
свыше 50 »	0,1 (в % от измеряемого давления)
Образцовые поршневые манометры 3-го разряда	0,2—0,3 (в % от измеряемого давления)
Образцовые пружинные манометры 3-го разряда	0,2—0,35% от предельного значения шкалы
Образцовый ртутный мановакуумметр:	
1-го разряда	0,1 *мм рт. ст.*
2-го разряда	0,2 » » »
Образцовый пружинный вакуумметр 3-го разряда	0,35% от предельного значения шкалы
Образцовые микроманометры 1-го разряда	0,005—0,01 *мм вод. ст.*
Рабочие манометры, мановакуумметры и вакуумметры	0,5—4% от предельного значения шкалы

Для предохранения манометрической линии от замерзания в зимнее время разделительный сосуд устанавливают вблизи точки отбора давления и его вместе с линией заполняют незамерзающей разделительной жидкостью (смесью глицерина с водой и др.).

При установке манометра ниже или выше точки отбора давления необходимо учитывать вес столба жидкости в трубке, который увеличивает или уменьшает показания манометра.

Манометры являются приборами, неисправность которых может повлечь за собой тяжелые аварии. В связи с этим все манометры подлежат периодической государственной поверке органами Комитета по делам мер и измерительных приборов или ведомственным надзором. Манометры, не имеющие пломбы, или с просроченной пломбой поверяющей организации считаются незаконными и к эксплуатации не допускаются.

Поверяются манометры, как было сказано, при помощи грузопоршневых и образцовых манометров.

В таблице приведены допустимые предельные погрешности основных приборов для измерения давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жоховский М. К. Техника измерения давления и разрежения. Машгиз, 1950.
2. Никитин В. А. Измерение давления и приборы специального назначения в нефтегазопереработке. Гостоптехиздат, 1955.
3. Агейкин Д. И., Костина Б. Н. и Кузнецова Н. Н. Датчики систем автоматического контроля и регулирования, справочные материалы. Машгиз, 1959.
4. Федосьев В. И. Упругие элементы в приборостроении. Оборонгиз, 1949.
5. Королев В. И. Основы вакуумной техники. Госэнергоиздат, 1953.

ГЛАВА 3

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

§ 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Температура является важнейшим параметром технологических процессов переработки нефти и газа. Качество продукции во многом зависит от точности поддержания заданной температуры в аппаратуре технологических установок.

На современном нефтезаводе измеряют температуру от —190 до +1500° С. Отрицательные температуры требуется измерять в лабораторных установках для анализа углеводородных газов, на промышленных установках по переработке газа, при регулировании давления естественного газа и др. Все процессы переработки нефти, крекинга, гидрогенизации и многие другие протекают при температурах до 800—900° С. Температура в топках печей достигает 1500° С.

Для измерения температуры в таком широком диапазоне применяют различные по принципу действия приборы.

Температурой называют величину, характеризующую степень нагретости тела.

Тепловое состояние тела определяется средней кинетической энергией поступательного движения молекул. Чем больше скорость движения молекул, тем выше температура тела, которая, однако, не определяет количества теплоты, заключенного в теле.

Все температурные изменения основаны на сравнении степени нагретости двух тел, поэтому измеряемая величина характеризует лишь разность между температурой тела и температурой другого тела, условно принятого за нуль.

В основу технических приборов для измерения температуры положены следующие физические явления: изменение объема тел и увеличение давления газов, паров и жидкостей в замкнутом объеме при нагревании; термоэлектрический эффект; изменение электрического сопротивления проводников и излучение тел при нагревании.

В настоящее время согласно ГОСТ 8550-61 в СССР применяются две температурные шкалы: термодинамическая температурная шкала и Международная практическая температурная шкала.

Термодинамическая температурная шкала была предложена в 1848 г. английским ученым Кельвином. Построение этой шкалы основано на втором законе термодинамики и не требует применения каких-либо приборов для измерения температуры.

Согласно второму закону термодинамики при любом рабочем теле, совершающим обратимый цикл Карно, имеет место соотношение

$$\frac{AL}{Q}=\frac{T_s-T_0}{T_0}, \qquad (3.1)$$

где A — тепловой эквивалент механической работы;
L — механическая работа одного цикла;
Q — количество тепла, отдаваемое телом приемнику тепла;
T_s — температура источника тепла;
T_0 — температура приемника тепла.

Из этого соотношения следует, что, измерив AL и Q, можно судить о температурном состоянии тела, не прибегая к помощи какого-либо термометра, т. е. используя лишь самый цикл Карно. Необходимым условием при построении термодинамической температурной шкалы является принятие определенного числа градусов в интервале температур между двумя какими-либо постоянными точками. За такой интервал принималась разность температур между реперными точками — точкой кипения воды при нормальном давлении и точкой таяния льда. Точка кипения воды была принята за 100°, а точка таяния льда за 0°. Тогда, $T_s - T_0 = 100°$. Из (3. 1) найдем

$$T_0=100\frac{Q}{AL}. \qquad (3.2)$$

Следовательно, численное значение температуры таяния льда можно определить, измерив работу, производимую за один цикл Карно, и количество тепла, отдаваемое таящему льду также за один цикл. Вычисления по формуле (3. 2) для указанных условий и любого рабочего тела дали величину $T_0 = 273{,}16°$ K.

Один градус термодинамической температурной шкалы обозначается °K (градус Кельвина) и соответствует разности температур изотерм, при которой в работу превращается $^1/_{100}$ часть тепла, отдаваемого приемнику при совершении рабочим телом цикла Карно, при этом источником тепла является кипящая вода и приемник тепла — тающий лед.

В 1954 г. Десятая Генеральная конференция по мерам и весам (Международного комитета мер и весов) установила термодинамическую температурную шкалу с одной реперной точкой, за которую принята тройная точка воды (температура равновесия между льдом, жидкой водой и водяным паром), лежащей выше точки таяния льда на 0,01°. Значение для температуры тройной точки воды в термодинамической температурной шкале принято 273,16° K точно. Нижней

границей шкалы является точка абсолютного нуля температуры. Температура, выраженная в градусах термодинамической шкалы, называемая еще абсолютной, обозначается буквой T.

На Десятой Генеральной конференции по мерам и весам было принято решение о том, что термодинамическая температура может быть выражена и в градусах Цельсия (°С) (обозначается буквой t). При этом отсчет ведется от точки плавления льда, лежащей на 0,0100° ниже тройной точки воды. Значение термодинамической температуры в градусах Цельсия определяется по формуле

$$t = (T - 273{,}15)^\circ \mathrm{C}. \tag{3.3}$$

Всякий интервал температуры, выраженный в °К или °С, имеет одно и то же числовое значение.

Термодинамическая температурная шкала, выраженная в градусах Цельсия, называется еще стоградусной термодинамической шкалой.

Вследствие экспериментальных трудностей, которые возникают при измерении температуры по термодинамической шкале для практических измерений, в 1960 г. Одиннадцатой Генеральной конференцией по мерам и весам введена Международная практическая температурная шкала, которая соответствует насколько возможно стоградусной термодинамической шкале и основана на определенных воспроизводимых температурах. Эта шкала является ранее применяемой Международной (стоградусной) температурной шкалой, утвержденной Девятой Генеральной конференцией по мерам и весам в 1948 г.

Международная практическая температурная шкала основана на следующих шести воспроизводимых температурах в °С (первичные постоянные точки).

Температура равновесия между жидким кислородом и его паром (точка кипения кислорода)	—182,97
Температура равновесия между льдом, жидкой водой и водяным паром (тройная точка воды)	+0,01
Температура равновесия между жидкой водой и ее паром (точка кипения воды)	100
Температура равновесия между жидкой серой и ее паром (точка кипения серы)	444,6
Температура равновесия между твердым серебром и жидким серебром (точка затвердевания серебра)	960,8
Температура равновесия между твердым и жидким золотом (точка затвердевания золота)	1063,0

Эти постоянные точки определяются состоянием равновесия при давлении 1 нормальной атмосферы (101 325 $н/м^2$), кроме тройной точки воды.

В Международной практической температурной шкале температура обозначается символом t или $t_{межд}$ и выражается в градусах стоградусной термодинамической шкалы, обозначаемых °С (градус Цельсия).

Температура в градусах Международной практической шкалы может быть выражена в значениях с началом отсчета от абсолютного нуля по формуле

$$T = (t + 273{,}15)^\circ \mathrm{K}, \qquad (3.4)$$

где T — температура по абсолютной термодинамической шкале.

Температура по термодинамической температурной шкале и Международной практической температурной шкале может быть выражена и в градусах Кельвина (°К) и в градусах Цельсия (°С) в зависимости от начала отсчета. В тех случаях, когда требуется точно указать, к какой температурной шкале относится температурный промежуток, следует обозначать «град (терм)», «deg (therm)» или «град (межд)», «deg (int)».

Температура, имеющая промежуточные значения между теми, которые указаны выше (шесть постоянных точек в градусах Международной практической температурной шкалы), устанавливается при помощи интерполяционных приборов: эталонными платиновыми термометрами сопротивления (от —190 до 660° С), эталонными платинородий-платиновыми термопарами (от 660 до 1063° С) и эталонным оптическим пирометром температур (свыше 1063° С).

Ранее (а в некоторых странах и сейчас) применялись шкалы Цельсия (°Ц), Реомюра (°Р) и Фаренгейта (°Ф). В шкале Цельсия точка таяния льда обозначается через 0°, а температура кипения воды 100°. В шкале Реомюра соответственно 0 и 80° и в шкале Фаренгейта 32 и 212°. За нуль шкалы Фаренгейта принималась температура охлажденной смеси из льда, нашатыря и поваренной соли. Указанные основные диапазоны делятся соответственно на 100, 80 и 180 равных частей, каждая из которых составляет один градус.

С развитием науки и техники эти шкалы перестали удовлетворять требованиям точности, и в настоящее время их в СССР не применяют. Шкала Фаренгейта до сих пор применяется в США и Англии. Число градусов шкалы Фаренгейта можно перевести в градусы Международной практической шкалы по формуле

$$n^\circ \mathrm{C} = \frac{n^\circ \Phi - 32}{1{,}8}, \qquad (3.5)$$

где n — число градусов.

Приборы для измерения температуры, применяемые на нефтегазозаводах, подразделяются на следующие группы.

1. Термометры расширения — жидкостно-стеклянные и биметаллические, основанные на изменении объема жидких тел и расширении твердых тел от нагревания.

2. Манометрические термометры, работающие на принципе изменения давления газа, пара и жидкостей в замкнутом объеме при изменении температуры.

3. Термоэлектрические пирометры, использующие термоэлектрический эффект.

4. Электрические термометры сопротивления, основанные на изменении электрического сопротивления проводников при изменении их температуры.

5. Пирометры излучения — оптические, работающие на принципе изменения интенсивности излучения определенной длины волны, и радиационные, основанные на изменении величины полной энергии, излучаемой телами при изменении температуры.

§ 2. ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие жидкостно-стеклянных термометров основано на тепловом расширении жидкости, которое характеризуется средним коэффициентом объемного расширения $\beta_{t_1 t_2}$:

$$\beta_{t_1 t_2} = \frac{V_{t_2} - V_{t_1}}{(t_2 - t_1) V_0} \ 1/град, \qquad (3.6)$$

где V_{t_2}, V_{t_1}, V_0 — объемы жидкости при температурах t_2, t_1 40° С.

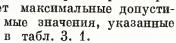
Жидкостно-стеклянные термометры (рис. 3. 1) состоят из небольшого резервуара, переходящего в капилляр. Находящаяся в нем жидкость при нагревании поднимается по капилляру и при охлаждении опускается. Шкалу термометра наносят на наружную поверхность стеклянной толстостенной капиллярной трубки (рис. 3. 1, *а*) или на пластину, располагаемую внутри стеклянного корпуса вдоль тонкой капиллярной трубки (рис. 3. 1, *б*).

Технические термометры, применяемые в промышленных условиях, заключаются в защитные металлические оправы (рис. 3. 1, *в*).

Наибольшее распространение получили ртутно-стеклянные термометры, которыми можно измерять температуру от —30 до +750° С. Так как ртуть кипит при температуре 357° С, в термометрах с верхним пределом измерения выше 150° С капилляр заполняют инертным газом под давлением. Для уменьшения длины шкалы термометры с высоким верхним пределом измерения изготовляют с запасным резервуаром (рис. 3. 2). В этом резервуаре скапливается ртуть при изменении температуры от 0° С до низшего предела измерения. Такие термометры одинаковы по длине и могут иметь шкалы, например, от 50 до 100° С, от 200 до 250° С и т. д.

Ртутно-стеклянные термометры изготовляют образцовые 1-го и 2-го разрядов, лабораторные и технические. Все они имеют шкалы, отградуированные в градусах Цельсия (°С).

Погрешность измерения ртутно-стеклянных термометров выражается в градусах температуры и имеет максимальные допустимые значения, указанные в табл. 3. 1.



Показания жидкостного термометра зависят не только от изменения объема жидкости, но и от изменения объема резервуара

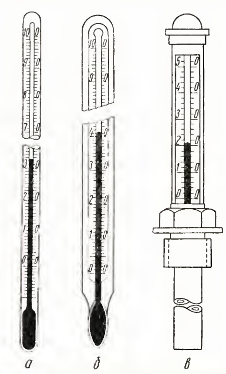


Рис. 3. 1. Жидкостно-стеклянные термометры.
а — палочный; б — с вложенной шкалой; в — технический в защитном металлическом чехле.

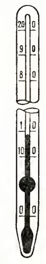


Рис. 3. 2. Ртутно-стеклянный термометр с запасным резервуаром.

Таблица 3. 1

Погрешность измерения ртутно-стеклянных термометров

Термометры	Погрешность измерения, °С	Температура, °С
Образцовые 1-го разряда . .	±0,01	0—100
То же	±0,1	—30—0 и 100—300
Образцовые 2-го разряда . .	±0,1	0—100
То же	±0,2	—30—0 и 100—300
Лабораторные	±0,1—0,25	—30—300
Технические	±0,25—0,5	0—150
»	±1	200—400
»	±2,5	400—500

и капиллярной трубки. Температурное расширение стекла приводит к уменьшению подъема жидкости в капилляре. Увеличение объема жидкости термометра характеризуется коэффициентом видимого расширения $\beta_{t_1t_2}$ жидкости, определяемого из уравнения

$$\beta_{t_1t_2} = \beta'_{t_1t_2} - \beta''_{t_1t_2}, \qquad (3.7)$$

где $\beta'_{t_1t_2}$ — температурный коэффициент расширения жидкости в интервале температур $t_2 - t_1$;

$\beta''_{t_1t_2}$ — температурный коэффициент расширения стекла в том же интервале температур.

Для изготовления термометров применяют специальные сорта стекол с малым $\beta''_{t_1t_2}$ (около 0,00002 1/*град*) или кварца, у которого $\beta''_{t_1t_2}$ до 700° С равен 0,000001 1/*град*. Коэффициент расширения ртути $\beta'_{t_1t_2}$ = 0,00018 1/*град*. Для ртутно-стеклянного термометра коэффициент видимого расширения составит около 0,00016 1/*град*.

Погрешность термометров возникает в основном от термического последствия стекла и от неравенства температуры выступающего столбика ртути и температур резервуара.

Термическое последствие стекла состоит в том, что резервуар термометра после изменения его температуры не принимает первоначального объема, что смещает нулевую точку термометра. Отличие температуры выступающего столбика ртути от температуры в резервуаре создает погрешность, поскольку не вся ртуть подвергается воздействию измеряемой температуры. Для уменьшения термического последствия стеклянные термометры после их изготовления подвергают отжигу или искусственному старению при высокой температуре. Для уменьшения влияния температуры выступающего столбика при измерениях термометр погружают в среду достаточно глубоко. Однако достичь этого не всегда удается. Поправку, которую надо внести в показания термометра на температуру выступающего столбика, можно вычислить по формуле

$$\Delta t = n(t - \theta)\,\beta_{t_1t_2}, \qquad (3.8)$$

где Δt — поправка в градусах;

n — высота выступающего столбика, выраженная в градусах шкалы термометра;

t — температура, показываемая термометром;

θ — средняя температура выступающего столбика, измеренная дополнительным термометром;

$\beta_{t_1t_2}$ — коэффициент видимого расширения ртути в стекле.

В трубопроводах для измерения температуры ртутными термометрами в соответствующих точках устанавливают карманы — стальные трубки с глухим дном (рис. 3. 3, *а*). Для лучшей теплопередачи карман иногда заполняют минеральным маслом или другой жидкостью с высокой температурой кипения. Технические термометры

в металлической оправе устанавливают в бобышку на резьбе (рис. 3.3, *б*). Постоянная времени ртутных термометров может быть от 5—6 *сек* до нескольких минут и зависит от характера среды, способа установки термометра, толщины защитного кармана или кожуха и других условий.

Благодаря хорошей электропроводности ртути ртутные термометры часто используются для сигнализации о повышении или понижении температуры до заданных пределов. Для этого через стекло в каппилляр термометра впаивают два металлических контакта, которые замыкаются и размыкаются столбиком ртути (рис. 3.4).

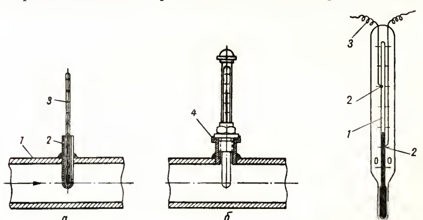


Рис. 3. 3. Установка технических ртутных термометров.

а — в защитном кармане; *б* — в защитной оправе; *1* — трубопровод; *2* — карман; *3* — термометр; *4* — бобышка.

Рис. 3. 4. Электроконтактный термометр.

1 — капилляр; *2* — контакты; *3* — провода.

Такие термометры называются электроконтактными. Существуют электроконтактные термометры, у которых верхний контакт можно перемещать внутри капилляра и тем самым получать сигнал при разных температурах. Электроконтактный термометр включают в соответствующую схему, и при замыкании его контактов загорается сигнальная лампа (могут быть использованы сирена, звонок и т. п.).

Жидкостно-стеклянные термометры, предназначенные для измерения низких температур, заполняют не ртутью, а другими жидкостями: этиловым спиртом с нижним пределом измерения до —100° С, толуолом до —90° С, петролейным эфиром до —130° С и пентаном до —190° С. Верхний предел измерения такими термометрами около 50° С. Эти термометры имеют ряд недостатков, понижающих точность измерения. Коэффициент расширения этих жидкостей сильно изменяется от температуры, что приводит к большой неравномерности шкал термометров. Применяемые жидкости смачивают стекло,

поэтому мениск в капилляре имеет вогнутую форму и затрудняет правильно отсчитывать показания. На показания сильно влияет температура выступающего столбика. В промышленных условиях термометры с нертутным заполнением обычно не применяются.

§ 3. БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Биметаллические термометры основаны на расширении твердых тел. Их изготовляют в виде металлической пластинки или ленты, свернутой в спираль, состоящей из двух металлов с разными коэффициентами температурного расширения. Биметалл изготовляют обычно из инвара (железоникелевый сплав) и латуни. Инвар имеет коэффициент расширения значительно меньше, чем латунь. При нагревании биметалл деформируется. По степени этой деформации можно судить о его температуре. Схема устройства биметаллического термометра показана на рис. 3. 5. Биметаллическую спираль заключают в стальную защитную трубку с резьбовым штуцером и устанавливают в месте измерения температуры. Внутренний металл спирали — латунь, а наружный инвар. При нагревании такая спираль разворачивается и стрелка перемещается по шкале вправо. Биметаллическими термометрами можно измерять температуру от —40 до +400° С. Их погрешность измерения составляет около ±5%.

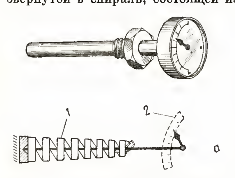


Рис. 3. 5. Биметаллический термометр.
а — схема; *б* — общий вид; *1* — биметаллическая спираль; *2* — шкала.

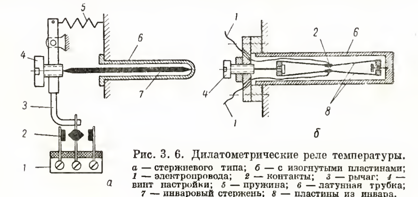


Рис. 3. 6. Дилатометрические реле температуры.
а — стержневого типа; *б* — с изогнутыми пластинами; *1* — электропровода; *2* — контакты; *3* — рычаг; *4* — винт настройки; *5* — пружина; *6* — латунная трубка; *7* — инваровый стержень; *8* — пластины из инвара.

Расширение твердых тел от нагревания используется еще в дилатометрических приборах, предназначенных для двухпозиционного регулирования температуры или сигнализации. Схемы двух таких устройств, называемых реле температуры, показаны на рис. 3.6. Действие этих реле основано на разных удлинениях наружной латунной трубки *6* и внутренних инваровых стержня *7* (рис. 3.6, *а*) или пластин *8* (рис. 3.7, *б*). Температурные пределы настройки таких реле от 0 до 250° С. Контакты реле замыкают и размыкают соответствующие цепи схемы регулирования или сигнализации температуры.

§ 4. МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие манометрических термометров основано на увеличении давления газа, насыщенного пара или жидкости при их нагревании в замкнутом объеме (рис. 3.7). Термометр состоит из термобаллона *2*, капиллярной трубки, заключенной в защитный металлический

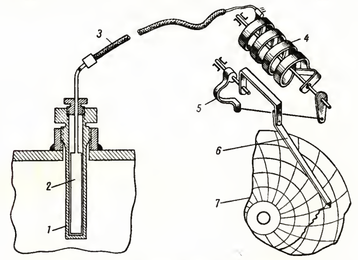


Рис. 3. 7. Схема манометрического термометра.

1 — защитная трубка; *2* — термобаллон; *3* — гибкий металлический шланг с капиллярной трубкой; *4* — манометрическая пружина; *5* — биметаллический компенсатор; *6* — стрелка; *7* — диаграммная бумага.

шланг *3*, манометрической пружины *4*, записывающего устройства со стрелкой *6* и диаграммной бумагой *7*, являющейся шкалой прибора. Манометрическая пружина может быть многовитковой, как показано на рис. 3. 7, а также одновитковой или многовитковой концентрической.

Поскольку в технологическом аппарате или трубопроводе, в которых измеряют температуру, имеется давление или разрежение,

для установки термобаллона требуется еще защитная трубка или карман. Когда среда, температуру которой нужно измерить, не коррозионная и находится при атмосферном давлении, защитную трубку не устанавливают.

В зависимости от вещества, заполняющего термосистему (термобаллон — капилляр — манометрическая пружина), манометрические термопары подразделяются на газовые, паро-жидкостные и жидкостные.

Технические газовые термометры получили наибольшее распространение для контроля и регулирования температуры в промышленных условиях. Их термосистему заполняют инертным газом, обычно азотом. Такими термометрами можно измерять температуру в пределах от -60 до $550°$ С.

Давление в термосистеме газового термометра изменяется от температуры по линейному закону, выраженному уравнением (для идеального газа)

$$p_t = p_0 (1 + \delta t), \qquad (3.9)$$

где p — давление газа при температуре t;

p_0 — давление газа при 0° С;

δ — термический коэффициент упругости, равный $\frac{1}{273{,}15}$ 1/°С.

В действительности эта зависимость более сложная, так как термосистему заполняют не идеальным, а реальным газом, а также из-за влияния расширения термобаллона и других деталей. Но эти отклонения компенсируются, поскольку каждый термометр градуируют по эталонному прибору. Шкала технических газовых термометров практически равномерна, и их погрешность составляет около $\pm 1{,}5\%$ от диапазона шкалы.

Приращение давления газа в термосистеме в пределах изменения температуры от нижнего t_0 до верхнего t_1 пределов измерения термометра находится из уравнения (3.1):

$$p_{t_1} - p_{t_0} = \Delta p = p_{t_0} \delta (t_1 - t_0), \qquad (3.10)$$

где p_{t_1} — давление в системе при температуре термобаллона t_1;

p_{t_0} — давление в системе при температуре термобаллона t_0.

Из (3. 10) следует, что величина Δp зависит от пределов измерения и от давления p_{t_0}, которое называется начальным. Например, при $p_{t_0} = 1$ *кГ/см²* и $t_1 - t_0 = 300°$ С

$$\Delta p = \frac{1 \cdot 300}{273{,}15} \approx 1{,}1 \ кГ/см^2.$$

Такое небольшое приращение давления может заметно искажаться от изменения внешнего атмосферного давления. Кроме того, при малом Δp труднее получить необходимое перемещение стрелки по шкале. Поэтому начальное давление p_{t_0} в термосистеме создается

от 10 до 16 *кГ/см²*; тогда, например, для прибора со шкалой 0—300° С при начальном давлении в системе 14 *кГ/см²* приращение давления составит

$$\Delta p = \frac{14 \cdot 300}{273{,}15} \approx 15{,}4 \text{ кГ/см}^2.$$

Такое значительное приращение давления облегчает его измерение и менее подвержено влиянию изменяющегося атмосферного давления. Высокое начальное давление и большое его приращение требуют применения достаточно прочных термобаллонов, капилляров и манометрических пружин.

Газ, находящийся в капилляре и в манометрической пружине, подвержен влиянию окружающей температуры, это приводит к некоторой дополнительной погрешности в показаниях термометра. Термометры градуируются при одной определенной температуре капилляра и пружины, обычно при +20° С.

Уменьшение погрешности от изменения температуры манометрической пружины и капилляра достигается увеличением объема газа, находящегося в термобаллоне, который составляет 90% от всего объема термосистемы.

Величину дополнительной погрешности в градусах температуры от нагревания манометрической пружины вычисляют по формуле

$$\Delta t_м = \frac{v_м}{v_б}(t_м - t_0), \tag{3.11}$$

где $\Delta t_м$ — погрешность;

$v_м$ — объем газа в манометрической пружине;

$v_б$ — объем газа в термобаллоне;

$t_м$ — температура среды, окружающей манометрическую пружину;

t_0 — температура пружины, при которой прибор градуировали.

Объем газа в термобаллоне принимают равным от 50 до 130 *см³* в зависимости от длины капилляра, которая для технических газовых термометров может быть от 10 до 60 *м*. Объем газа в манометрической пружине 4—6 *см³*.

Аналогично можно вычислить дополнительную погрешность прибора при отклонении температуры капилляра термометра от градуировочной

$$\Delta t_к = \frac{v_к}{v_б}(t_к - t_0), \tag{3.12}$$

где $\Delta t_к$ — погрешность в °С;

$v_к$ — объем газа в капиллярной трубке;

$v_б$ — объем газа в термобаллоне;

$t_к$ — температура капилляра;

t_0 — температура капилляра при градуировке прибора.

Объем капилляра зависит от его длины и может достигать 6—8 *см³*. Внутренний диаметр капиллярной трубки обычно равен 0,2—0,5 *мм*.

При значительных отклонениях температуры манометрической пружины и капилляра от градуировочной дополнительные погрешности $\Delta t_м$ и $\Delta t_к$ могут достигать нескольких градусов.

Для исключения влияния отклонений температуры манометрической пружины от градуировочной в технических газовых термометрах применяют биметаллический компенсатор *5* (рис. 3. 7), который создает перемещения стрелки, компенсирующие погрешность в показаниях прибора. Каких-либо устройств для компенсации погрешности из-за отклонений температуры капилляра от градуировочной в газовых технических термометрах обычно не применяют.

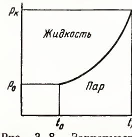


Рис. 3. 8. Зависимость давления p насыщенного пара от температуры t.

p_0 — минимальное давление при температуре низшего предела измерения t_0; $p_К$ — давление при критической температуре $t_К$.

Газовые технические термометры выпускают самопишущие, показывающие с пневматической и электрической телепередачей, а также регулирующие и сигнальные. Они имеют сравнительно большую постоянную времени (0,1—3 *мин*), в особенности при установке термобаллона в защитный карман. Объясняется это малым коэффициентом теплопередачи от стенок термобаллона к газу. Наиболее уязвимой деталью термометров является капилляр, обрыв которого выводит прибор из строя.

Действие паро-жидкостных термометров основано на зависимости давления насыщенного пара от температуры. Зависимость эта однозначна, но не линейна (рис. 3. 8).

Верхний предел измерения лимитируется критической температурой, выше которой вся жидкость переходит в пар. Нижний предел определяется минимальным давлением пара при низкой температуре и чувствительностью прибора. Каждому значению температуры соответствует строго определенное давление пара, которое быстро увеличивается с ее ростом. Это приводит к неравномерности шкалы термометра. При более высоких температурах на один градус изменения температуры стрелка прибора совершает больший ход, чем при низких. В связи с этим чувствительность термометра неравномерна, в начале шкалы она ниже, чем в конце. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при низшем пределе измерения в нем оставался еще пар и при высшем — жидкость.

Давление в термосистеме изменяется от нескольких десятков *мм рт. ст.* до 35 *кГ/см*². При невысоких температурах на показания термометра изменение барометрического давления влияет сильнее, чем при высоких.

В паро-жидкостных термометрах могут применяться различные жидкости в зависимости от требуемых пределов измерения. Для

пределов измерения от —40 до +90° С применяют пропан, от —10 до +140° С — сернистый ангидрид, от +10 до 220° С — этиловый спирт, от +10 до +315° С — толуол и т. д.

Поскольку давление пара зависит только от температуры его жидкости, то на показания паро-жидкостных термометров не оказывает влияние температура капилляра и манометрической пружины. В этом отношении паро-жидкостные термометры выгодно отличаются от газовых и жидкостных термометров. Это свойство позволяет изготовлять термобаллоны паро-жидкостных термометров малых размеров.

Капилляр и манометрическая пружина паро-жидкостного термометра в процессе его работы могут быть заполнены или паром, или жидкостью. Если окружающая температура выше температуры термобаллона, то капилляр и манометрическая пружина заполнены паром, если же эта температура ниже, то жидкостью. Однако процесс конденсации или испарения жидкости в капилляре и манометрической пружине не вносит погрешности в показания прибора.

Когда температура термобаллона выше температуры капилляра, т. е. когда капилляр заполнен жидкостью, на показания паро-жидкостного термометра влияет расположение термобаллона относительно манометра по вертикали. Это объясняется действием гидростатического давления столба жидкости в капилляре, оказываемым на манометр. Если термобаллон выше манометра, то показания прибора завышаются, если ниже, то занижаются. Это обстоятельство учитывают как при градуировках, так и при установках приборов и в их показания вносят соответствующие поправки. Иногда приборы снабжают корректором для смещения стрелки в целях устранения влияния давления столба жидкости в капилляре.

Паро-жидкостные манометрические термометры широко применяются для измерения температуры в двигателях самолетов, дизелях и т. п. Они могут быть изготовлены очень малых размеров с малым весом. В практике контроля температуры промышленных процессов этот вид термометров большого распространения не получил. Погрешность их составляет около ± 2,0% от диапазона шкалы, причем для начального участка шкалы допускается увеличение погрешности в 1,5 раза.

Паро-жидкостными термометрами можно измерять температуру от —180 до +250° С. Длина их капилляра может быть от 1 до 60 *м*. Постоянная времени паро-жидкостных термометров примерно в 2,5 раза меньше, чем у газовых.

Действие жидкостных манометрических термометров основано на возрастании давления жидкости в замкнутом объеме. В этих приборах вся система полностью заполняется жидкостью под некоторым начальным давлением, чаще всего ртутью. Применяют также ксилол и другие жидкости.

Жидкостными манометрическими термометрами с ртутным заполнением можно измерять температуру в пределах от —30 до +550° С, с ксилолом от —40 до +350° С.

Теоретически подсчитано, что давление ртути в жестком замкнутом объеме при ее нагревании на 1° С повышается на 45 *кГ/см²* и при нагреве до 500° С оно должно повысится до 22 500 *кГ/см²*. Другие жидкости развивают давление в пределах 10—15 *кГ/см²* на 1° С. В действительности же в манометрических жидкостных термометрах давление не повышается столь сильно вследствие увеличения объема термосистемы от действия температуры и давления. Так например, в термометрах с ртутным заполнением при нагревании термобаллона до 500° С давление в системе не превышает 175 *кГ/см²*.

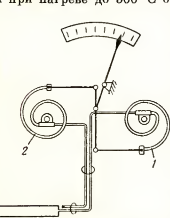


Рис. 3. 9. Схема жидкостного манометрического термометра с дополнительной компенсационной термосистемой.

1 — измерительная термосистема; *2* — компенсационная термосистема.

На показания жидкостных термометров сильно влияют отклонения температуры капилляра и манометрической пружины от градуировочной. Величина дополнительной погрешности может быть вычислена по формулам (3. 11) и (3. 12) для газовых термометров. Для уменьшения погрешности объемы капилляра и манометрической пружины предусматривают как можно меньше. Имеются термометры, у которых для компенсации влияния температуры капилляра и манометрической пружины встроена вторая термосистема, но без термобаллона (рис. 3. 9). Действие манометрической пружины компенсационной термосистемы направлено на стрелку прибора в сторону вычитания ошибки. Капилляр компенсационной системы проложен в одном защитном чехле с капилляром измерительной системы. Иногда применяют капилляр, внутри которого проложена инваровая проволока в целях уменьшения свободного объема. Этим достигаются примерно равные приращения объема жидкости и свободного объема капилляра при его нагревании, вследствие чего давление жидкости от изменения температуры капилляра не изменяется.

На показания жидкостного манометрического термометра оказывает также влияние высота расположения термобаллона над манометром.

Жидкостные манометрические термометры имеют равномерную шкалу. Длина их капилляра обычно не превышает 10 *м*; погрешность составляет около $\pm 2\%$.

Значение постоянной времени жидкостных термометров находится между значениями газовых и паро-жидкостных термометров.

В последние годы получили распространение пневматические датчики температуры, построенные на базе манометрических термометров. Такие датчики, кроме одной из описанных выше термо-

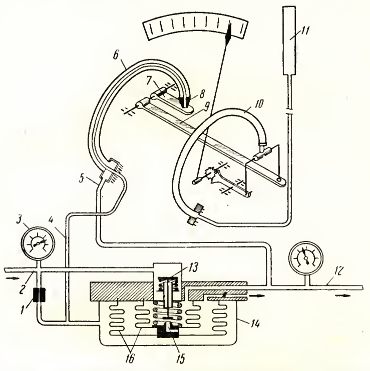


Рис. 3. 10. Схема пневматического датчика температуры с манометрическим термометром с одновитковой пружиной.

1 — постоянный дроссель; 2 — трубка питания воздухом; 3 — манометр; 4 — трубка к соплу; 5 — трубка обратной связи; 6 — манометрическая пружина обратной связи; 7 — заслонка; 8 — сопло; 9 — рычаг заслонки; 10 — манометрическая пружина термометра; 11 — термобаллон; 12 — трубка выхода воздуха; 13 — входной клапан; 14 — вторичное реле; 15 — выходной клапан; 16 — сильфоны.

систем, имеют еще пневматические устройства для преобразования измеряемой температуры в пропорциональное ей давление сжатого воздуха. Последнее по трубке малого диаметра передается на вторичный прибор.

Один из распространенных пневматических датчиков температуры почти ничем (за исключением воздействия на манометр от термосистемы) не отличается от датчика давления, описанного в главе 4 (см. рис. 2. 17).

На рис. 3. 10 показана схема пневматического датчика температуры с одновитковой трубчатой пружиной. Измерительная часть этого датчика состоит из термобаллона *11*, соединенного капилляром с одновитковой манометрической пружиной *10*, передаточного механизма, стрелки и шкалы. Пневматическое устройство состоит из системы сопла *8*, заслонки *7* и усилителя или вторичного реле *14*. Измерительная часть воздействует на пневматическую через рычаг *9*.

Действие пневматической части датчика аналогично действию устройства манометра с пневматической телепередачей (см. рис. 2. 17). При увеличении измеряемой температуры заслонка *7* приближается, а при уменьшении отводится от сопла *8*. Пневматическое устройство питается сжатым воздухом давлением 1,1—1,2 *кГ/см*^{2}, поступающего по трубке *2*. Основной поток воздуха направляется к усилителю и через клапаны *13* и *15* стремится выйти к вторичному прибору по трубке *12*. Часть сжатого воздуха через дроссель *1*, представляющий собой небольшой участок трубки диаметром около 0,2 *мм*, по тонкой трубке, проходящей внутри манометрической пружины *6*, поступает к соплу *8* и выходит через него в атмосферу. Сопло имеет отверстие, площадь которого в несколько раз больше площади сечения дросселя. Воздух, проходящий через дроссель, кроме сопла, поступает еще в замкнутое пространство над сильфонами *16* вторичного реле. Когда сопло открыто, давление в трубках и в пространстве над сильфонами равно атмосферному, сильфоны *16* находятся в разжатом положении, клапан *13* прикрыт, а клапан *15* открыт и сообщает полость между сильфонами с атмосферой, давление на выходе снижается до атмосферного. Когда сопло прикрыто заслонкой, то давление над сильфонами возрастает, сильфоны сжимаются, клапан *15* прикрывается, а клапан *13* открывается, давление на выходе повышается до 1 *кГ/см*^{2}. Пропорциональное действие, при котором каждому значению температуры в пределах шкалы прибора отвечает вполне определенное давление воздуха на выходе, создается манометрической пружиной *6* обратной связи. Эта пружина сообщена с трубкой *12*, и давление в ней всегда равно давлению на выходе. Когда заслонка приближается к соплу от возрастания температуры термобаллона, давление на выходе и в пружине *6* возрастает, последняя разжимается и отводит сопло от заслонки. Если измеряемая температура больше не изменяется, то и положение заслонки относительно сопла остается неизменным и на выходе устанавливается определенное давление. При дальнейшем увеличении измеряемой температуры заслонка все более приближается к соплу и давление на выходе постепенно растет.

Прибор отрегулирован так, что когда измеряемая температура равна значению нижнего предела шкалы прибора, заслонка только начинает прикрывать сопло и давление на выходе равно 0,2 *кГ/см*^{2}. Когда температура достигает верхнего предела измерения, заслонка полностью прикрывает сопло и выходное давление становится рав-

ным 1 $кГ/см^2$. Каждому промежуточному значению температуры соответствует всегда одно и то же промежуточное значение выходного давления.

Соотношение площадей сильфонов усилителя подобрано таким, что давление на выходе возрастает от 0,2 до 1 $кГ/см^2$ при изменении давления в системе сопла всего до 0,25 $кГ/см^2$.

Сжатый воздух по трубке *12* от датчика передается вторичному прибору — показывающему или самопишущему манометру с пределами измерения 0,2—1 $кГ/см^2$, шкала которого градуируется в градусах температуры.

§ 5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

В приборах этого вида используется термоэлектрический эффект. Название «пирометры», что означает приборы для измерения высоких температур, сохранилось до наших дней по традиции, хотя теперь этими приборами измеряют и очень низкие (до —200°) температуры.

Термоэлектрический эффект впервые в 1758 г. был открыт русским ученым академиком Эпинусом. В литературе можно встретить указание, что этот эффект был открыт в 1821 г. академиком Российской Академии наук Зеебеком.

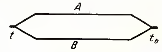


Рис. 3. 11. Термоэлектрическая цепь из двух разнородных проводников.

Для пояснения термоэлектрического эффекта обратимся к простейшей цепи, состоящей из двух разнородных проводников A и B (рис. 3. 11). Как видно из схемы, концы проводников (обычно проволок) соединены между собой и образуют спаи. Если температура одного из спаев больше температуры другого $t > t_0$, то в замкнутой цепи появляется постоянный электрический ток. Ток этот образуется вследствие возникновения электродвижущей силы (э. д. с.), которую называют термоэлектрической. В силу закона сохранения энергии электрическая энергия в проводниках возникает при поглощении ими тепла от внешнего источника. Если разорвать цепь проводников A и B и пропустить по ним постоянный ток от какого-либо источника в направлении, противоположном термоэлектрическому току, то спай с более высокой температурой охлаждается, а с более низкой нагревается. Этот эффект, открытый Пельтье в 1834 г., доказывает, что термоэлектродвижущая сила возникает в спаях разнородных металлов. Степень охлаждения и нагрева спаев пропорциональна только величине тока.

Электродвижущую силу, возникающую в месте спая двух разнородных металлов, называют э. д. с. Пельтье, величина ее и полярность зависят от температуры спаев и металлов проводников.

В 1854 г. английский физик Томпсон (лорд Кельвин) показал, что и в однородном проводнике при разных температурах его концов возникает электродвижущая сила, величина которой зависит от разности температур концов проводника и от рода металла.

Термоэлектрические явления объясняются диффузией свободных электронов. Число свободных электронов, отнесенное к единице объема, неодинаково в разных металлах. При тесном соприкосновении электроны диффундируют из металла с бо́льшим их содержанием в металл с меньшим содержанием в большем количестве, чем в обратном направлении. Вследствие этого первый металл заряжается положительно, а второй отрицательно. Возникающее в месте соприкосновения электрическое поле препятствует этой диффузии. При некотором значении напряжения этого поля устанавливается динамическое равновесие, при котором скорости диффузии электронов из одного металла в другой становятся равными. При таком установившемся состоянии на свободных концах металлов возникает разность потенциалов.

В однородном проводнике, концы которого имеют разную температуру, концентрация свободных электронов в месте с более высокой температурой больше, чем в месте с меньшей температурой. Электроны от более нагретой части диффундируют в менее нагретую с большей интенсивностью, чем в обратном направлении. Более теплый конец приобретает положительный потенциал, а более холодный отрицательный. И в этом случае создается равновесное состояние от влияния сил возникающего электрического поля, препятствующего процессу диффузии электронов.

В термоэлектрической цепи эффекты Пельтье и Томпсона протекают одновременно и разделить их невозможно. Поэтому э. д. с., возникающая в цепи из двух разнородных проводников, является суммой четырех э. д. с., возникающих в спае с высокой температурой, в спае с низкой температурой и в двух однородных проводниках.

Теория термоэлектрических явлений дает аналитическое выражение величины суммарной э. д. с. для разных температур спаев и разного числа свободных электронов, приходящихся на единицу объема:

$$E = \frac{k}{e} \int_{t_0}^{t} \ln \frac{N_B}{N_A}\, dt, \qquad (3.13)$$

где E — суммарная э. д. с. цепи;

N_A и N_B — число свободных электронов в единице объема проводников A и B;

t и t_0 — температура спаев;

k — постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/°К*;

e — заряд электрона, равный $4{,}802 \cdot 10^{-10}$ *абс. эл. ст. ед.*

Но это выражение не дает возможности производить количественные вычисления, поскольку величины N_A и N_B не поддаются учету и закон изменения их с изменением температуры неизвестен.

Если обозначить неопределенный интеграл через φt, то уравнение (3. 13) можно написать в виде:

$$E = \frac{k}{e} [\varphi(t) - \varphi(t_0)]. \tag{3. 14}$$

Отсюда следует, что общая э. д. с. цепи, состоящей из двух разнородных металлов, равна разности двух значений некоторой функции при температуре t и t_0. При малой разности $(t - t_0)$ можно допустить, что N_A и N_B постоянны, тогда

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{N_B}{N_A} (t - t_0) \tag{3. 15}$$

или, заменяя постоянные величины общим коэффициентом, получаем

$$E = K(t - t_0). \tag{3. 16}$$

Термопары

Два разнородных проводника, образующих термоэлектрическую цепь, называются **термопарой**. При измерениях температуры один спай термопары погружается в измеряемую среду, а температуру второго спая стремятся поддерживать постоянной и невысокой (0 или 20° С). Спай, который подвергается действию температуры измеряемой среды, называют **горячим спаем**, а другой **холодным спаем** или **свободными концами**. Проводники, образующие термопару, называют термоэлектродами. Один из термоэлектродов термопары положителен, а другой отрицателен. Величина э. д. с. термопары невелика и измеряется в милливольтах. Для измерения э. д. с. необходимо применить измерительный прибор, который можно включить в спай термопары (рис. 3. 12, *а*) или в один из ее термоэлектродов (рис. 3. 12, *б*). В общем случае включение измерительного прибора можно рассматривать как включение третьего проводника в цепь термопары (обычно проводники цепи и приборы делают медными).

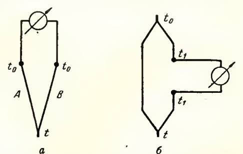


Рис. 3. 12. Схемы включения измерительного прибора в цепь термопары.
а — в холодный спай; *б* — в один из электродов.

Если температура контактов в местах подключения третьего проводника одинакова, то на суммарную э. д. с. термопары не оказывает влияние третий проводник, она зависит лишь от температуры ее спаев t и t_0. Возникающие э. д. с. в местах подключения третьего проводника к термоэлектродам при этом условии взаимно компенсируются.

Горячий спай термопары может быть изготовлен сваркой и пайкой с включением между проводниками третьего металла, который при малых размерах имеет практически всегда одинаковую температуру.

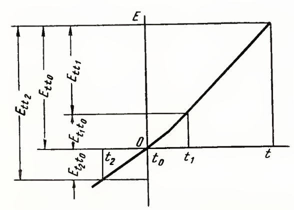


Рис. 3. 13. Зависимость э. д. с. термопары от температуры.

Наибольшее распространение получило включение измерительного прибора в холодный спай термопары.

Термопара, используемая для измерения температуры, должна иметь строго определенную характеристику: зависимость э. д. с. от температуры горячего спая при каком-либо определенном постоянном значении температуры ее холодного спая. Обычно градуировочные таблицы для термопар строят при температуре холодного спая, равной 0° С. Однако в практике не всегда возможно поддерживать температуру холодного спая и в показания термопары необходимо вносить поправки.

На рис. 3. 13 показана зависимость э. д. с. термопары от температуры t горячего спая при градуировочной температуре холодного спая t_0.

При температуре горячего спая t и холодного t_0 э. д. с. термопары обозначим через E_{tt_0}. Если действительная температура холодного спая будет выше, например t_1, то, как видно из рисунка, э. д. с. термопары E_{tt_1} будет меньше чем E_{tt_0} на величину э. д. с. $E_{t_1t_0}$ этой же термопары, когда горячий спай ее нагрет до действительной

температуры холодного спая t_1, а температура холодного спая равна t_0. Следовательно, получим уравнение

$$E_{tt_0} = E_{tt_1} + E_{t_1 t_0}, \qquad (3.17)$$

в котором второй член правой части есть поправка на температуру холодного спая.

Если действительная температура холодного спая ниже градуировочной, например равна t_2, то э. д. с. термопары возрастает. Для получения ее величины при градуировочной температуре холодного спая поправку $E_{t_2 t_0}$ необходимо вычесть из значения E_{tt_2}, т. е.

$$E_{tt_0} = E_{tt_2} - E_{t_2 t_0}. \qquad (3.17a)$$

Термопары можно изготовлять из любых разнородных металлов или сплавов. Однако не все они отвечают требованиям измерения температуры. Термоэлектродные материалы и изготовленные из них термопары должны быть достаточно жаростойкими, сохранять постоянство э. д. с. на протяжении всего срока их службы, иметь по возможности большую величину э. д. с. и прямолинейную зависимость ее от температуры, быть легко воспроизводимыми для обеспечения взаимозаменяемости и по возможности стойкими к воздействию агрессивных сред.

В СССР применяются в основном следующие технические термопары.

1. Платинородий-платиновая термопара обозначается буквами ПП. Положительный термоэлектрод платинородий (сплав 90% Pt + 10% Rh), отрицательный — платина. Платина должна быть чистой, удовлетворяющей следующим условиям:

$$\frac{R_{100}}{R_0} \geqslant 1{,}39 \text{ и } \varrho < 0{,}106 \; ом \cdot мм^2/м,$$

где R_{100} и R_0 — сопротивления платиновой проволоки при 100 и 0° С;

ϱ — удельное сопротивление платины.

При промышленных измерениях термопара должна быть защищена от воздействия окислов металлов, кремнезема, окиси углерода и других восстановительных сред. Пригодна для длительных измерений температур до 1300° С и кратковременных до 1600° С. По жаростойкости, стойкости к воздействию агрессивных сред и постоянству характеристики платинородий-платиновая термопара превосходит все другие типы промышленных термопар. Выпускаются эталонные образцовые термопары 1-го и 2-го разрядов и рабочие. Толщина проволок термоэлектродов обычно равна 0,5 *мм*. Недостатком этой термопары является низкая э. д. с. по сравнению с э. д. с. других термопар, поэтому для точного измерения температур до 300° С обычно такую термопару не применяют.

Платинородий-платиновая термопара называется еще термопарой из благородных металлов в отличие от остальных, изготовленных из неблагородных металлов.

2. Хромель-алюмелевая термопара обозначается буквами ХА. Положительный термоэлектрод хромель (сплав 89% Ni + 9,8% Cr + 1% Fe + 0,2% Mu), отрицательный алюмель (сплав 94% Ni + 2,0% Al + 2,5% Mn + 0,5% Fe + + 1,0% Si). Применяется при длительных измерениях до 900—1000° С, при кратковременных до 1300° С. Нижний предел измерения —50° С. Выпускается только как рабочая термопара. Достаточно стойка к агрессивным средам. Толщина термоэлектродов при измерении высоких температур около 3 *мм*. По постоянству характеристики уступает платинородий-платиновой термопаре.

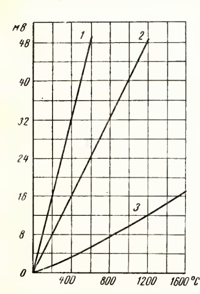


Рис. 3. 11. Графические характеристики для термопар хромель-копелевой (*1*), хромель-алюмелевой (*2*) и платинородий-платиновой (*3*).

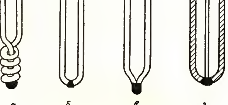


Рис. 3. 15. Горячие спаи термопар.

а, б и *в* — электроды из проволок; *г* — один электрод (наружный) в виде трубки.

3. Хромель-копелевая термопара обозначается буквами ХК. Положительный термозлектрод хромель, отрицательный копель (сплав 44% Ni + 56% Cu). Применяется при длительных измерениях до 600° С, при кратковременных до 800° С, нижний предел измерения —50° С. Толщина термозлектродов 1—3 *мм*. По постоянству характеристика также уступает платинородий-платиновой термопаре. Выпускается только как рабочая термопара. Развивает по сравнению с термопарами других типов наибольшую э. д. с.

На рис. 3. 14 приведены характеристики термопар при температуре холодного спая 0° С. В приложениях 1, 2 и 3 приведены градуировочные таблицы термопар. Допустимые погрешности измерения термопарами даны в табл. 3. 2.

Таблица 3.2

Предельные погрешности измерения температуры термопарами

Термопара	Погрешность измерения		Измеряемая температура, °C
	°C	% от измеряемой температуры	
Платинородий-платиновая:			
эталонная	±0,1 ÷ 0,2	—	600—1300
образцовая 1-го разряда	±0,4	—	600—1300
образцовая 2-го разряда	±0,7	—	600—1300
рабочая	—	±0,3	—
Хромель-алюмелевая, хромель-копелевая и др.	—	±1	—

Кроме перечисленных типов, применяют термопары железо-константановые (0—800° С), медь-константановые (—200 ÷ +200° С) и некоторые другие.

На рис. 3. 15 показаны различные способы изготовления горячих спаев термопар, которые обычно выполняются сварными.

Термоэлектроды термопары всегда изолируют для предупреждения замыкания их между собой и на землю. Свободные концы подключают к клеммам, расположенным в головке термопары. Обычно применяют фарфоровые изоляторы (рис. 3. 16). Вместо одноканальных применяют также двухканальные фарфоровые изоляторы. Для изоляции термопар из термоэлектродов диаметром до 0,5 *мм* применяют также фарфоровые стержни с двумя каналами. Горячий спай термопар не изолируют.

Для защиты термопар от воздействия различных сред, а также для возможности установки их в аппаратуру, работающую под давлением или разрежением, применяют защитные трубки различных видов.

Для платинородий-платиновых термопар, измеряющих высокую температуру в топках печей, используют жаростойкие защитные трубки из фарфора, а иногда из кварца (рис. 3. 17, *а*). Для хромель-алюмелевых термопар, устанавливаемых в газоходах печей, применяют защитные трубки из жароупорной легированной стали, для установки термопар в аппаратах, работающих под давлением, — из нержавеющей стали с резьбовым штуцером (рис. 3. 17, *б*). Длина погружаемой части технических термопар может быть различной от 200 *мм* до 6 *м*. Головка термопар, герметично закрываемая крышкой на винтах, имеет резьбовой штуцер для подсоединения стального гибкого шланга или трубки, в которой прокладывают соединительные провода к прибору, измеряющему э. д. с. термопары.

Поскольку в промышленных условиях, как правило, устанавливать термопары без защитной трубки невозможно, принимают меры к улучшению условий теплопередачи от среды к горячему спаю термопары. Это достигается, например, прижатием конца горячего спая к донышку защитной трубки, а также применением специальных трубок (рис. 3. 17, *в*), предназначаемых для работы под высоким давлением, у которых горячий спай термопары находится в тесном контакте с металлом заостренного донышка.

Защитная трубка термопары весьма ответственная деталь, ее поломка может привести к серьезной аварии на технологической установке.

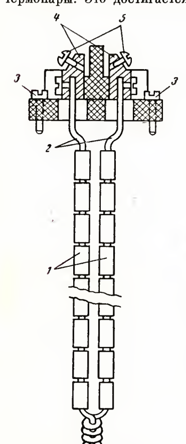


Рис. 3. 16. Техническая термопара.

1 — фарфоровые изоляторы; *2* — термоэлектроды; *3* — крепежные винты; *4* — латунные контакты; *5* — клеммы.

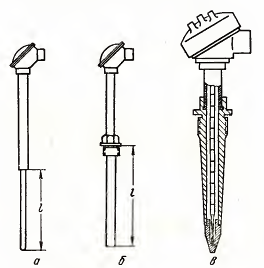


Рис. 3. 17. Защитные трубки термопар.

а — с фарфоровым наконечником; *б* — стальная; *в* — стальная для малоинерционной термопары; *l* — длина погружаемой части термопары.

Для измерения температуры металлических поверхностей применяют специальные поверхностные термопары. Горячий спай поверхностной термопары приваривают к плоскому донышку защитной трубки (рис. 3. 18). При измерениях донышко должно плотно прилегать к поверхности, температура которой измеряется.

Для более точного измерения допускается приварка горячего спая непосредственно к измеряемой поверхности.

Термопары, как и всякий другой источник э. д. с., можно соединять между собой последовательно и параллельно. Группу из последовательно соединенных термопар называют *термобатареей*, ее э. д. с. равна сумме э. д. с. отдельных термопар.

Для измерения двумя термопарами разности температур их соединяют, как показано на рис. 3. 19.

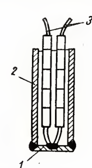


Рис. 3. 18. Горячий спай поверхностной термопары.

1 — плоское донышко защитной трубки; 2 — защитная трубка; 3 — термоэлектроды.

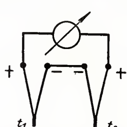


Рис. 3. 19. Схема включения двух термопар для измерения разности температур.

Когда требуется измерить температуру в нескольких разных точках какого-либо аппарата, применяют *многозонную термопару* с одним общим термоэлектродом (рис. 3. 20) и не-

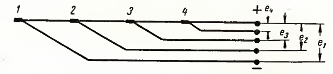


Рис. 3. 20. Схема многозонной термопары.

1, 2, 3 и 4 — горячие спаи; e_1 — e_4 — э. д. с. отдельных термопар.

сколькими горячими спаями. Термоэлектроды такой термопары изолируют и заключают в общую защитную трубку. Имеются термопары, в которых защитной трубкой является один из термоэлектродов (см. рис. 3. 15, г). Такая термопара имеет малую инерционность и называется иногда *карандашной*; применяется она редко из-за высокой стоимости.

Компенсационные провода

Подключать термопару к измерительному прибору можно обыкновенными медными (или из другого металла) проводами. В этом случае холодный спай термопары будет находиться в головке термо-

пары, в местах подключения медных проводов. Как уже было указано, на величину э. д. с. термопары, а следовательно, и на показания прибора оказывает влияние не только температура горячего спая, но и температура холодного спая. При измерениях отклонения температуры холодного спая от градуировочной учитывают и вносят соответствующие поправки. Это неудобно, так как связано с дополнительным измерением температуры холодного спая ртутно-стеклянным термометром и вычислениями поправок. В лабораторной практике, где позволяют условия, термопару делают достаточно длинной и места соединения ее термоэлектродов с медными проводами погружают в термостат с тающим льдом, в котором температура равна 0° С. В приборах, измеряющих температуру в промышленных условиях, применяют особые устройства, которыми поправка к показаниям на изменения температуры холодного спая вносится автоматически без участия наблюдателя.

В этих устройствах, как будет показано ниже, применяются термочувствительные элементы (сопротивления из металла с высоким температурным коэффициентом), которые должны иметь температуру, равную температуре холодного спая термопары. Это достигается переносом холодного спая термопары в корпус измерительного прибора, где находятся и термочувствительные элементы, при помощи компенсационных проводов *.

Если компенсационные провода изготовить из термоэлектродных материалов, то отнесение холодного спая от головки равноценно простому удлинению термопары. Однако из-за высокой стоимости термоэлектродных материалов к этому не прибегают. В качестве компенсационных проводов используют другие, по составу более дешевые проводники. Так, например, для хромель-алюмелевой термопары компенсационный провод изготовляют из меди (положительный) и константана (сплав 60% Cu + 40% Ni; отрицательный). Для платинородий-платиновой термопары компенсационный провод изготовляют из меди (положительный) и из медно-никелевого сплава (99,4% Cu + 0,6% Ni, отрицательный).

Эти провода в паре между собой развивают э. д. с. в пределах 0—100° С такую же, как и соответствующие термопары.

Для термопары хромель-копелевой компенсационной провод изготовляют из хромеля и копеля. Но в этом случае в целях удешевления компенсационные провода изготовляют из менее качественных материалов, которые имеют сходную характеристику лишь до 100° С. Чтобы холодный спай не нагревался, выступающую часть термопары удлиняют настолько, чтобы ее головка не могла нагреться (вследствие теплопроводности) выше 100° С.

* Компенсационные провода называют еще удлинительными и термоэлектродными.

Компенсационные провода, обычно двойные в общей оплетке, выпускаются различных видов: в резиновой, в термостойкой или асбестовой изоляции, в свинцовой броне и др. При подключении компенсационных проводов необходимо соблюдать полярность. Ошибка в полярности подключения приводит к ошибкам при измерениях.

Пирометрические милливольтметры

Простейшим прибором, которым измеряют э. д. с. термопары, является милливольтметр, построенный на принципе действия магнитоэлектрического гальванометра. Милливольтметр со

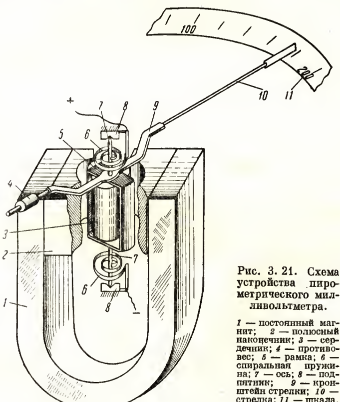


Рис. 3. 21. Схема устройства пирометрического милливольтметра.

1 — постоянный магнит; 2 — полюсный наконечник; 3 — сердечник; 4 — противовес; 5 — рамка; 6 — спиральная пружина; 7 — ось; 8 — подпятник; 9 — кронштейн стрелки; 10 — стрелка; 11 — шкала.

шкалой, градуированной в градусах температуры, называется пирометрическим.

Устройство милливольтметра показано на рис. 3. 21. В кольцевом зазоре между полюсными наконечниками *2* постоянного магнита *1*

и сердечником *3* на осях (кернах), покоящихся в подпятниках *8*, расположена рамка *5*. Рамка состоит из большого числа скрепленных между собой лаком витков тонкой медной проволоки в эмалевой изоляции, концы которой подсоединены к осям *7*. К рамке прикреплен кронштейн *9* со стрелкой *10*, конец которой может перемещаться вдоль шкалы *11*. Рамка включается в цепь термопары, и по ней протекает электрический ток, подводимый через спиральные пружинки *6*. От взаимодействия магнитного поля, возникающего в результате прохождения по рамке тока, с магнитным полем постоянного магнита создается вращающий момент, рамка поворачивается и перемещает стрелку по шкале *11* вправо. Спиральные пружинки *6* противодействуют вращению рамки. Каждому установившемуся значению тока в рамке, а следовательно, и з. д. с. термопары отвечают только одно положение стрелки. При отсутствии тока рамка за счет упругости пружинок возвращается к нулевому делению на левой стороне шкалы. Кронштейн *9* снабжен противовесом *4* для уравновешивания веса стрелки.

Угол φ поворота рамки в состоянии равновесия определяется уравнением

$$\varphi = C \frac{B}{E} i, \tag{3.18}$$

где C — постоянный коэффициент, зависящий от размеров и числа витков рамки и размеров спиральных пружинок;
B — магнитная индукция в зазоре;
E — модуль упругости материала спиральных пружинок при растяжении или сдвиге в *г/см²*;
i — сила тока, протекающего через рамку, в *а*.

Шкалу милливольтметра градуируют в градусах температуры для определенного типа термопары. Иногда на шкалу наносят еще деления в милливольтах.

Для повышения чувствительности и устранения сил трения в некоторых приборах рамку подвешивают на двух тонких ленточных растяжках, а иногда на одной подвеске.

Существуют нуль-гальванометры, предназначенные для обнаружения слабых токов в электрических цепях. При отсутствии тока в цепи рамки такого гальванометра его стрелка устанавливается на нулевое деление, которое находится посредине шкалы. Нуль-гальванометры не имеют на шкале делений в градусах температуры или в милливольтах. Обычно их шкалы имеют по нескольку делений (до 10) справа и слева от нулевого при угле отклонения стрелки 15—20° от середины шкалы.

Схема включения милливольтметра в цепь термопары показана на рис. 3. 22.

Поскольку в цепи протекает электрический ток, то на каждом ее участке имеется падение напряжения, равное произведению силы

тока на сопротивление участка. Исходя из этого, напряжение E' на клеммах милливольтметра составит

$$E' = \frac{E(R_д + R_р)}{r_т + r_п + R_д + R_р}, \qquad (3.19)$$

где E — э. д. с. термопары в *в*;
$R_д$ — добавочное сопротивление милливольтметра в *ом*;
$R_р$ — сопротивление рамки в *ом*;
$r_т$ — сопротивление термопары в *ом*;
$r_п$ — сопротивление проводов в *ом*.

Из (3. 19) следует, что напряжение E' на клеммах милливольтметра всегда меньше э. д. с. термопары и что на величину этого напряжения влияет изменение сопротивления цепи термопары. Сопротивление $R_д$ делают из манганина (имеющего очень малый коэффициент температурного сопротивления) и оно не изменяется при колебаниях окружающей температуры. Рамку милливольтметра

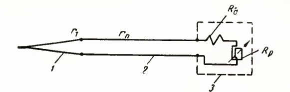


Рис. 3. 22. Схема включения милливольтметра в цепь термопары.

1 — термопара; 2 — провода; 3 — милливольтметр. Сопротивления: $r_т$ — термопары; $r_п$ — проводов; $R_д$ — добавочное для милливольтметра; $R_р$ — рамки.

изготовляют из медной проволоки, ее сопротивление изменяется при изменениях температуры. Поскольку прибор обычно устанавливают в помещении, где температура примерно постоянна, изменения $R_р$ незначительны.

Сопротивления термопары и проводов изменяются от изменения их температуры. Термопара нагревается от измеряемой среды, а температура проводов от окружающей температуры.

Учесть влияние изменения сопротивления термопары и проводов трудно; это является большим недостатком измерения э. д. с. милливольтметром. Для уменьшения этого влияния, как это видно из (3. 19), необходимо увеличить сопротивление $R_д$.

Все милливольтметры градуируются при определенных значениях сопротивлений $r_т$ и $r_п$, суммарная величина которых называется **внешним сопротивлением** и принимается равной обычно 5, 15 и 25 *ом*. Это позволяет применять разные длины соединительных проводов. Величина внешнего сопротивления должна быть равной указанной в паспорте милливольтметра. Для этого в цепь добавляют еще подгоночное сопротивление, включенное

в один из проводов перед прибором. Чем больше величина $R_д$ по сравнению с $R_р$, тем меньше влияние изменения сопротивления рамки. Но предусматривать $R_д$ очень большим нельзя, так как это уменьшает силу тока в цепи и снижает чувствительность милливольтметра. Практически величину $R_д$ берут равной до 300—400 *ом*.

Пирометрические милливольтметры изготовляют показывающими и самопишущими. Самопишущие милливольтметры в настоящее время на нефтезаводах не применяются. Погрешность милливольтметров: лабораторных $\pm 1\%$, промышленных $\pm 1,5$—$2,5\%$ от диапазона шкалы.

Потенциометры

Другим более точным методом измерения э. д. с. термопары является к о м п е н с а ц и о н н ы й. Этот метод основан на компенсации или уравновешивании измеряемой э. д. с. известной разностью потенциалов. Приборы для измерения э. д. с., работающие на принципе компенсации, называются п о т е н ц и о м е т р а м и.

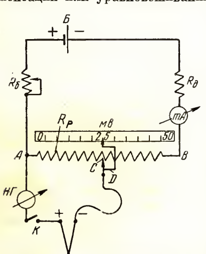


Рис. 3. 23. Схема измерения э. д. с. термопары компенсационным методом.

Принципиальная схема измерения э. д. с. термопары компенсационным методом показана на рис. 3. 23.

Источник тока *Б* — батарея, обычно один сухой элемент напряжения около 1,5 *в* — включается в цепь из реостата $R_б$, калиброванного сопротивления $R_р$, называемого реохордом, и добавочного сопротивления $R_д$. В эту же цепь включен миллиамперметр *mA*. Согласно закону Ома на каждом сопротивлении цепи при прохождении тока создается разность потенциалов. Установив в цепи ток определенной силы, можно получить на концах реохорда $R_р$ разность потенциалов в несколько десятков милливольт, которая при измерениях должна поддерживаться строго постоянной. Последнее достигается регулировкой тока реостатом $R_б$ по показаниям миллиамперметра. Реохорд изготовляют в виде спирали на жестком каркасе из манганиновой проволоки равного сечения.

Падение напряжения вдоль реохорда равномерно. Значение напряжения отмечается на шкале, расположенной рядом с реохордом. Указатель шкалы механически связан с движком *D*. Добавоч-

ное сопротивление $R_д$ требуется для увеличения общего сопротивления цепи батареи, чтобы была обеспечена необходимая величина тока батареи.

К точке A — началу реохорда — и к движку D подключается термопара, э. д. с. которой измеряют. При замыкании ключа K образуется цепь, состоящая из термопары и участка AC реохорда. В этой цепи может протекать ток, который обнаруживается чувствительным магнитоэлектрическим нуль-гальванометром $НГ$.

При измерениях сначала устанавливают определенный ток в цепи батареи при разомкнутом ключе K. Затем замыкают ключ K и наблюдают за стрелкой нуль-гальванометра. Если она даст отклонение, то перемещают движок D в такое положение, при котором стрелка установится точно на нулевом делении. Последнее означает, что в цепи термопары ток отсутствует. В этом случае э. д. с. термопары компенсирована равной и противоположно направленной разностью потенциалов на участке AC реохорда, создаваемой током батареи. Отсчет величины э. д. с. термопары берется по шкале реохорда.

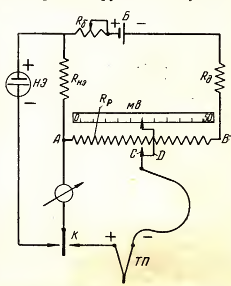


Рис. 3. 24. Схема потенциометра с нормальным элементом.

Ток, протекающий через нуль-гальванометр до момента компенсации, называется током небаланса, так как он возникает под действием напряжения небаланса, равного разности между э. д. с. термопары и компенсирующей разности потенциалов.

В практике для установления или стандартизации определенной силы тока в цепи батареи миллиамперметром не пользуются, так как он, являясь стрелочным прибором, сам по себе обладает сравнительно большой погрешностью. Обычно в схемах потенциометров, как лабораторных, так и промышленных, вместо миллиамперметра для стандартизации тока батареи применяют **нормальный элемент**, обладающий большим постоянством своей э. д. с.

Измеряют э. д. с. термопары потенциометром с нормальным элементом (рис. 3. 24). Перед началом измерения стандартизируют ток батареи, для чего ключ K замыкают с контактом нормального элемента $НЭ$ и реостатом батареи $R_б$ регулируют ток батареи до такой

величины, при которой на сопротивлении нормального элемента $R_{нэ}$ образуется разность потенциалов, равная и противоположно направленная э. д. с. нормального элемента. Обнаруживается это по отсутствию отклонения стрелки нуль-гальванометра. После этого ключ K замыкают с контактом термопары и измеряют э. д. с. термопары, как и в схеме без нормального элемента.

После стандартизации величина тока батареи в цепи будет равна

$$I_б = \frac{E_{нэ}}{R_{нэ}}, \qquad (3.20)$$

где $I_б$ — ток батареи;

$E_{нэ}$ — э. д. с. нормального элемента.

Такой же силы ток будет протекать и через реохорд. Следовательно, э. д. с. термопары $E_{тп}$ будет равна:

$$E_{тп} = R_{AC} I_б. \qquad (3.21)$$

Подставляя в (3.21) значение $I_б$ из (3.20), получим

$$E_{тп} = R_{AC} \frac{E_{нэ}}{R_{нэ}}. \qquad (3.22)$$

Поскольку в уравнение (3.22) не входят величины сопротивлений термопары и проводов, то, следовательно, на результат измерения эти сопротивления не оказывают влияния. Объясняется это тем, что в момент компенсации в цепи термопары отсутствует ток. Величины $E_{нэ}$ и $R_{нэ}$ постоянны, величина R_{AC} измеряется с большой точностью при помощи нуль-гальванометра.

В схеме потенциометра нуль-гальванометр является индикатором момента компенсации или момента баланса схемы. Чем чувствительнее нуль-гальванометр, тем с большей точностью можно измерить э. д. с. термопары.

Изменения сопротивлений термопары и проводов не оказывают влияния на показания потенциометра, что является его большим преимуществом перед милливольтметром.

Пределы измерения потенциометров для измерения э. д. с. термопар составляют 0—70 *мв*. Величина тока батареи принимается равной от 1 до 10 *ма*; при этом токе батарея работает без замены более одного месяца.

Нормальный элемент является важной деталью, так как от величины и постоянства его э. д. с. зависит градуировка шкалы потенциометра.

Устройство нормального элемента Вестона показано на рис. 3. 25. Э. д. с. такого элемента при температуре 20° С равна 1,01830 *в*, в пределах от 5 до 40° С изменяется очень мало. Нормальный элемент нельзя подвергать температуре ниже 5° и выше 40° С, так как это может вызвать невосстанавливаемые изменения его

э. д. с. Нельзя нагружать его током более чем 0,001 *а*. Нормальный элемент монтируют в небольшой защитной пластмассовой коробке с двумя клеммами для его включения в схему. При работе ток батареи проверяют периодически, и нормальный элемент бóльшую часть времени выключен.

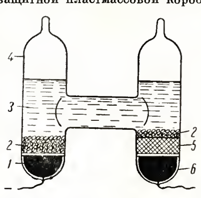


Рис. 3. 25. Нормальный элемент Вестона.

1 — амальгама кадмия; *2* — кристаллы сернокислого кадмия; *3* — насыщенный при 4° С раствор сернокислого кадмия; *4* — стеклянный герметичный Н-образный сосуд; *5* — паста из кристаллов сернокислой закиси ртути и сернокислого кадмия; *6* — ртуть.

На рис. 3. 26 приведена схема переносного потенциометра, применяемого для измерения э. д. с. термопар. Эта схема является принципиально схемой, описанной выше (рис. 3. 24), но в нее внесены некоторые изменения. Для удобства взятия отсчета в цепь батареи *Б* введено декадное сопротивление $R_{дек}$. Реохорд зашунтирован сопротивлением $R_{ш}$, введено сопротивление $R_{г}$, шунтирующее нуль-гальванометр *НГ*. Добавлен переключатель $П_1$. Ток батареи при стандартизации устанавливается равным 3 *ма*. На декадном сопротивлении создается разность потенциалов 60 *мв* с разбивкой на 10 *мв*, на реохорде 11 *мв*.

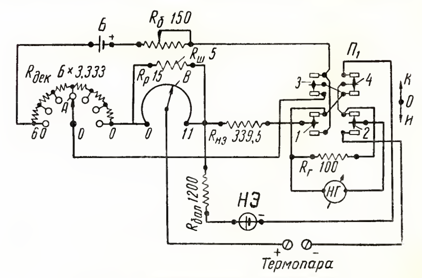


Рис. 3. 26. Схема переносного потенциометра.

Компенсирующее напряжение снимается с движков сопротивлений $R_{дек}$ и $R_р$. Десятки милливольт отсчитываются по $R_{дек}$, а единицы по $R_р$. Цена наименьшего деления шкалы реохорда равна 0,05 *мв*. Общие пределы измерения 71 *мв*.

Переключатель $П_1$ может находиться в трех положениях: среднем или нулевом, когда прибор не действует; в положении *К* — контроль тока батареи и в положении *И* — измерение. На схеме переключатель показан в положении *0*, контакты *1*, *2*, *3* и *4* замкнуты на внутренние пластины своих групп. При этом цепь батареи разомкнута. Нуль-гальванометр шунтирован сопротивлением $R_г$. Шунтирование способствует быстрому успокоению рамки гальванометра и удерживает ее от резких колебаний при переносках потенциометра за счет противоэлектродвижущей силы, возникающей в рамке.

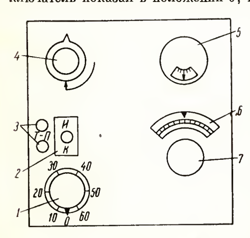


Рис. 3. 27. Расположение деталей на лицевой панели переносного потенциометра.

— декадное сопротивление; *2* — переключатель рода работ; *3* — клеммы для подключения термопары; *4* — рукоятка реостата батареи; *5* — шкала нуль-гальванометра; *6* — шкала реохорда; *7* — рукоятка реохорда.

При переводе переключателя в положение *К* контакты *1* и *2* не изменяют своего предыдущего положения, а контакты *3* и *4* замыкаются на внешние пластины. При этом цепь батареи замыкается и нормальный элемент *НЭ* подключается к концам сопротивления $R_{нэ}$. В цепь нормального элемента включается нуль-гальванометр, зашунтированный сопротивлением $R_г$. Ток батареи регулируется реостатом $R_б$ по отклонению стрелки нуль-гальванометра. В положении *И* контакты переключателя $П_1$ *1* и *2* замыкаются на их внешние пластины, а контакты *3* и *4* на внутренние. При этом цепь батареи остается замкнутой, нормальный элемент отключается и к движкам $R_{дек}$ и $R_р$ присоединяется термопара, нуль-гальванометр без шунтирующего сопротивления включается в цепь термопары.

Сопротивление $R_{бал}$ служит для ограничения тока нормального элемента.

Потенциометром можно пользоваться и как источником напряжения, величина которого определяется положениями движков $R_{дек}$ и $R_р$. Напряжение это поступает с клемм для подключения термопары. Погрешность описанного переносного потенциометра составляет $\pm 0{,}5\%$ от диапазона шкалы.

Все детали переносного потенциометра смонтированы в небольшом деревянном ящике с крышкой. Ручки управления, шка́лы нуль-гальванометра и реохорда расположены на лицевой панели (рис. 3. 27). Реохорд в этом приборе выполнен в виде спирали на жестком каркасе, уложенной по краям окружности пластмассового диска. При работе реохорд и его шкала вращаются вручную относительно неподвижных контакта и указателя.

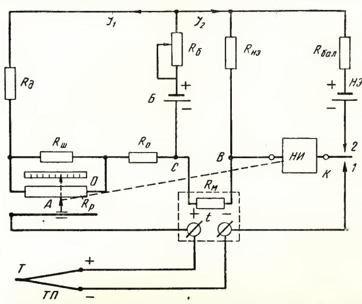


Рис. 3. 28. Электрическая схема автоматического потенциометра.

При измерении температуры в показания переносного потенциометра необходимо вносить поправки на температуру холодного спая. Вычисляются поправки по соответствующим градуировочным таблицам для термопар.

Величина поправки, как это следует из уравнения (3. 17), равна э. д. с. термопары, у которой горячий спай нагрет до действительной температуры холодного спая, а температура холодного спая равна градуировочной. Если действительная температура холодного спая выше градуировочной, то поправка прибавляется к э. д. с. термопары, а если ниже, то вычитается.

Существуют более сложные схемы лабораторных потенциометров с меньшей погрешностью ($\pm 0{,}1 \div \pm 0{,}2\%$), предназначенных для поверки других приборов.

Для промышленных измерений большое распространение получили автоматические потенциометры, в которых

движок реохорда перемещается автоматически от специального следящего механизма. В этих потенциометрах имеется устройство для непрерывного автоматического внесения поправки в показания на температуру холодного спая термопары.

На рис. 3. 28 приведена электрическая схема автоматического потенциометра с устройством для введения поправки на температуру холодного спая. Ток от батареи, пройдя реостат $R_б$, разветвляется на две цепи. Одна цепь (левая) состоит из добавочного сопротивления $R_д$, реохорда $R_р$ с шунтом $R_ш$ и сопротивления R_0, а вторая — из сопротивления нормального элемента $R_{нэ}$ и сопротивления $R_м$. По этим двум цепям ток батареи протекает непрерывно. Э. д. с. термопары прилагается к точкам A и B схемы при замыкании ключа $К$ с контактом *1* через нуль-индикатор *НИ*. Последним может быть нуль-гальванометр или электронный усилитель, устройство и действие которого описаны ниже.

Схема содержит еще нормальный элемент *НЭ*, которым устанавливается ток батареи при подключении его к концам сопротивления $R_{нэ}$. В цепь нормального элемента включено ограничительное сопротивление $R_{бал}$, не допускающее увеличения тока нормального элемента свыше 1 *ма*.

Все сопротивления схемы, кроме $R_м$, изготовлены из манганиновой проволоки и не изменяют своих величин от действия температуры. Лишь сопротивление $R_м$ изготовлено из медной (иногда из никелевой) проволоки. При увеличении температуры оно увеличивается, а при понижении уменьшается. Сопротивление $R_м$ в виде небольшой катушки располагается на панели рядом с клеммами для подсоединения компенсационных проводов термопары *ТП*, находящихся в корпусе потенциометра. Этим достигается равенство температур холодного спая термопары и сопротивления $R_м$.

Для стандартизации тока батареи ключ $К$ переводят в положение *2* и, наблюдая за показаниями нуль-индикатора, регулируют реостат $R_б$ так, чтобы ток в цепи нуль-индикатора стал равным нулю.

При измерении температуры ключ $К$ замыкают с контактом *1*. К схеме подключается термопара. Э. д. с. термопары компенсируется разностью потенциалов, создаваемой током батареи между точками A и B схемы. Эта разность потенциалов изменяется в зависимости от положения движка реохорда. Когда движок находится в правом крайнем положении, то разность потенциалов между точками A и B равна э. д. с. термопары, соответствующей температуре начальной отметки шкалы. При положении движка в левом крайнем положении эта разность потенциалов увеличивается до значения, соответствующего э. д. с. термопары при температуре верхнего предела измерения.

При отсутствии компенсации по цепи термопары протекает ток небаланса и нуль-индикатор дает показания, отличные от нулевого.

В приборе имеется специальный кинематический механизм следящей системы, приводимый в действие электродвигателем, которым движок реохорда перемещается автоматически в положение баланса схемы в зависимости от показаний нуль-индикатора. Когда схема находится в состоянии баланса, движок больше не перемещается, в это время стрелка потенциометра показывает по шкале величину температуры T горячего спая термопары.

Для момента компенсации справедливо равенство

$$E_{T\,0} - E_{t\,0} = U_{AB} = U_{R_p} + U_{R_0} - U_{R_M}, \qquad (3.23)$$

где $E_{T\,0}$ — э. д. с. термопары при температурах ее горячего спая $T°$ С и холодного спая 0° С;

$E_{t\,0}$ — поправка на температуру холодного спая или э. д. с. термопары при температуре горячего спая $t°$ С и холодного спая 0° С;

U_{AB} — разность потенциалов между точками A и B схемы;

U_{R_p} — разность потенциалов на участке реохорда $A\,0$:

U_{R_0} — разность потенциалов на сопротивлении R_0;

U_{R_M} — разность потенциалов на сопротивлении R_M.

Левая часть уравнения есть э. д. с. термопары при действительной температуре холодного спая, причем принято, что эта температура больше 0° С, так как прибор устанавливается всегда в отапливаемом помещении. Правая часть уравнения является величиной компенсирующей разности потенциалов.

Величины E_{T_0} и U_{R_p} при неизменной температуре T постоянны, величина U_{R_0} также постоянна. Переменными величинами, зависящими от температуры t холодного спая, являются E_{t_0} и U_{R_M}. Они изменяются при колебаниях температуры одинаково. В результате насколько изменяется э. д. с. термопары от изменения температуры холодного спая, настолько же изменяется величина компенсирующей разности потенциалов. Если температура горячего спая не изменяется, а изменяется лишь температура холодного спая, то равенство (3. 23) не нарушается и указатель шкалы потенциометра не изменяет своего положения. При изменении же температуры горячего спая термопары изменяется величина E_{T_0} и равенство нарушается. Прибор автоматически изменяет величину U_{R_p}, подводя движок реохорда к точке баланса; по достижении этой точки равновесие снова восстанавливается, но стрелка показывает уже другую температуру горячего спая термопары.

В этом и состоит принцип действия непрерывной автоматической компенсации температуры холодного спая термопары.

При более глубоком анализе действия устройства для компенсации температуры холодного спая можно видеть, что оно вносит

некоторую погрешность в показания прибора. Расчет сопротивления $R_м$, которое является основным элементом этого устройства, ведется для температуры холодного спая 20° С. При отклонениях от этой температуры характер изменения разности потенциалов на сопротивлении $R_м$ и изменения э. д. с. термопары несколько различны. Это объясняется как некоторой нелинейностью э. д. с. термопары, так и нелинейностью изменения сопротивления $R_м$ от температуры. Погрешность также вносится и по той причине, что при изменениях $R_м$ изменяется ток батареи. Но сумма всех погрешностей, вносимых сопротивлением $R_м$, составляет лишь незначительную часть основной погрешности потенциометра, которая не превышает $\pm 1\%$ от диапазона шкалы.

Автоматические потенциометры, имеющие описанную выше схему с нуль-гальванометром в качестве нуль-индикатора и с кинематическим механизмом для автоматического перемещения движка реохорда и указателя шкалы, называются электромеханическими. Потенциометры этого вида долгое время применялись для измерения температуры в промышленных условиях. Их недостатком являлась периодичность действия кинематического механизма, что затрудняло измерение быстро изменяющихся температур. Чувствительность таких потенциометров ограничивалась свойствами нуль-гальванометра.

С развитием промышленной электроники появились электронные потенциометры непрерывного и быстрого действия с весьма высокой чувствительностью.

Измерительная часть схемы электронных потенциометров принципиально не отличается от описанной выше схемы потенциометра (см. рис. 3. 28).

В электронных потенциометрах в качестве нуль-индикатора используется электронный усилитель. Постоянное напряжение небаланса преобразуется в переменное и усиливается в электронном усилителе. Усиленное напряжение небаланса управляет вращением реверсивного электродвигателя, который через механическую передачу перемещает движок реохорда в сторону баланса схемы и одновременно перемещает указатель шкалы.

Принципиальная схема электронного потенциометра приведена на рис. 3. 29. Сопротивления $R_{бат}$, $R_к$, $R_м$, $R_б$, $R_п$, $R_ш$, R и $R_н$ образуют измерительную часть схемы, которая почти не отличается от схемы электромеханического потенциометра.

Сопротивление R_0 служит для сигнализации о разрыве цепи термопары. Если бы не было этого сопротивления, то при разрыве цепи термопары указатель шкалы оставался бы в положении, занятом им до момента разрыва, и показания были бы ложными. При измерении с сопротивлением R_0 часть тока батареи проходит через него и создает падение напряжения, которое вместе с напряжением

небаланса поступает на вход электронного усилителя. При разрыве цепи термопары на вход усилителя поступает напряжение только с сопротивления R_0, это приводит к перемещению указателя к верхнему пределу шкалы. Величина R_0 выбирается такой, что дополнительное напряжение очень мало и вызываемая им дополнительная погрешность не превышает $\pm 0{,}05\%$ от диапазона шкалы.

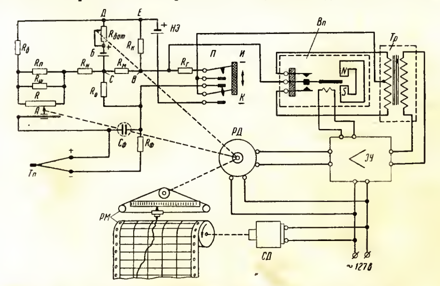


Рис. 3. 29. Электрическая схема электронного потенциометра.

$R_{бат}$ — реостат батареи; $R_б$ — сопротивление для подгонки верхнего предела измерения; $R_п$ — сопротивление для подгонки диапазона шкалы; $R_ш$ — шунт реохорда; R — реохорд; $R_н$ — сопротивление для подгонки нижнего предела измерения; $R_м$ — сопротивление медное; $R_к$ — сопротивление для установки тока батареи по нормальному элементу; R_0 — сопротивление для сигнализации о разрыве цепи термопары; $R_г$ — сопротивление в цепи нормального элемента; $R_ф$ и $C_ф$ — сопротивление и конденсатор фильтра цепи термопары; *П* — переключатель; *Б* — батарея; *Тп* — термопара; *Вп* — вибропреобразователь; *Тр* — входной трансформатор; *ЭУ* — электронный усилитель; *РД* — реверсивный двигатель; *СД* — синхронный двигатель; *РМ* — механизм регистрации показаний.

Сопротивление $R_ш$ служит для подгонки сопротивления реохорда до определенного значения, что необходимо для создания условия взаимозаменяемости реохордов.

В цепь термопары включены сопротивление $R_ф$ и конденсатор $C_ф$, образующие фильтр, преграждающий проникновение в схему переменных напряжений, наводящихся в термопаре и проводах от переменных магнитных полей электрооборудования, имеющегося на промышленных установках.

Переключатель *П* при работе находится в положении *И* — измерение. Для проверки тока батареи переключатель переводится в положение *К* — контроль.

Э. д. с. термопары при измерении подводится к точкам *A* и *B*. Как видно из схемы, в цепь тока небаланса включены вибропреобразователь *Вп* и первичная обмотка входного трансформатора *Тр*.

Вибропреобразователь предназначен для преобразования постоянного напряжения небаланса в переменное с частотой 50 *гц*. Средняя пластина вибропреобразователя имеет на конце железный сердечник и непрерывно вибрирует с частотой 50 *гц* от действия магнитных полей постоянного магнита и катушки возбуждения, питаемой переменным током. Вибрирующая пластина поочередно замыкает (и размыкает) боковые контакты. Ток небаланса проходит по разным половинам первичной обмотки трансформатора *Тр* в противоположном направлении. Это равносильно протеканию по ней переменного тока частотой 50 *гц*. Во вторичной обмотке наводится переменное напряжение, которое поступает на вход электронного усилителя *ЭУ*. Усиленное напряжение небаланса управляет вращением реверсивного двигателя *РД*, перемещающего движок реохорда в направлении, при котором восстанавливается баланс схемы; одновременно двигатель *РД* перемещает указатель и перо по шкале прибора.

При перемене полярности напряжения небаланса ток в первичной обмотке входного трансформатора изменяет направление, отчего во вторичной обмотке переменное напряжение изменяет фазу на 180°. Изменяется также фаза усиленного напряжения, и реверсивный двигатель начинает вращаться в обратном направлении. Это создает условие для перемещения движка из любого положения к точке баланса.

В момент компенсации напряжение небаланса равно нулю, ток небаланса отсутствует. На вход усилителя напряжение не подается, и реверсивный двигатель останавливается.

Благодаря быстродействию электронного усилителя движок реохорда перемещается практически одновременно с изменениями измеряемой температуры, что является большим преимуществом электронных потенциометров.

При переводе переключателя в положение *K* — проверка (или стандартизация) тока батареи цепь термопары отключается. Нормальный элемент подключается к точкам *E* и *B* схемы. Одновременно в цепь нормального элемента включается сопротивление $R_г$, с концов которого напряжение через вибропреобразователь подается к электронному усилителю. Если э. д. с. нормального элемента не равна разности потенциалов на концах сопротивления $R_к$, то через сопротивление $R_г$ протекает ток и на вход усилителя подается напряжение. Усилитель приводит в действие реверсивный двигатель, вращение вала которого передается в это время приводу реостата $R_{бат}$. Последний, изменяя свое сопротивление, изменяет ток, протекающий через сопротивление $R_к$ до тех пор, пока падение напряжения на нем не станет равным э. д. с. нормального элемента. В этот

момент через сопротивление $R_г$ ток не протекает и двигатель останавливается.

Операция проверки тока батареи протекает полуавтоматически. Требуется только нажать кнопку переключателя, чем также приводится в сцепление реостат $R_{бат}$ с реверсивным двигателем. Наблюдение за окончанием операции ведется по указателю шкалы, который должен после отклонения от исходного положения остановиться. После этого кнопку отпускают и потенциометр продолжает измерять температуру.

В потенциометрах некоторых типов операция проверки тока автоматизирована полностью. При помощи шестеренчатой передачи через каждые 2—3 *ч* переключатель *П* автоматически переводится в положение *К* и удерживается в течение нескольких секунд, за которые двигатель подрегулировывает реостат $R_{бат}$. Затем переключатель автоматически переводится в положение *И*.

На рис. 3. 29 приведена схема потенциометра с ленточной диаграммой. Вал реверсивного двигателя через механическую систему передачи перемещает указатель с пером, которое наносит кривую изменения температуры на диаграмму. Ленточная диаграмма приводится в поступательное движение синхронным электродвигателем *СД*, питаемым переменным током от сети.

Существует большое число разновидностей электронных потенциометров: самопишущие с дисковой или ленточной диаграммой на одну и несколько (до 24) точек измерения, показывающие, регулирующие в больших корпусах и малогабаритные. Самопишущие потенциометры с ленточной диаграммой выпускаются с устройством, которое позволяет изменять скорость движения диаграммы от 60 до 9600 *мм/ч*, а также с различной скоростью пробега всей шкалы указателем от 1 до 8 *сек* при напряжении небаланса, превышающем пределы измерения. Потенциометры с большой скоростью перемещения указателя применяют для измерения быстро изменяющихся температур.

Шкалы электронных потенциометров градуируются в градусах температуры для термопары определенного типа. Шкалы бывают односторонние, например 0—300, 0—600 и 0—1600° С, двусторонние $-50 \div +200°$ С и безнулевые 400—900° С, 300—600° С и т. п. Потенциометры специального назначения выпускаются и со шкалой в милливольтах. Верхний предел измерения ограничен применимостью термопар и не превышает 1600° С для платинородий-платиновой термопары.

Основная погрешность электронных потенциометров $\pm 0{,}5\%$ от диапазона шкалы. Требование к соблюдению этой погрешности ограничивает выбор диапазона шкалы. Так, например, потенциометр со шкалой в переводе на милливольты менее 0—10 *мв* уже не может быть построен с сохранением указанной погрешности. С уменьшением диапазона шкалы возрастает относительная величина

погрешностей, вносимых наводками в цепи термопары и сопротивлением, компенсирующим температуру холодного спая.

Чувствительность потенциометра определяется тем минимальным приращением напряжения небаланса на входе электронного усилителя, которое еще вызывает вращение реверсивного двигателя и перемещение указателя по шкале. Чувствительность электронного усилителя вместе с вибропреобразователем очень высока, и он может привести в действие реверсивный двигатель при напряжении небаланса 1—3 *мкв*. Но из-за того, что реохорд имеет конечное число витков, минимальное напряжение, которое может быть подано на вход усилителя при разбалансе схемы, определяется падением потенциала на одном витке реохорда. Меньшее напряжение не может быть получено, так как при минимальном перемещении движок может перейти лишь с одного витка на другой (соседний). По конструктивным соображениям реохорды изготовляют с числом витков, не превышающим 1600. При диапазоне измерения 0—10 *мв* на один виток приходится около 6 *мкв*; при увеличении пределов измерения эта величина соответственно возрастает. Таким образом, реохорд препятствует повышению чувствительности потенциометров.

Электронные усилители потенциометров различных видов очень сходны по своим принципиальным схемам и отличаются лишь некоторыми второстепенными деталями и типом электронных ламп. В малогабаритных приборах используют пальчиковые электронные лампы, имеющие меньшие размеры по сравнению со стандартными лампами металлической серии. Изготовляются усилители на полупроводниках, которые имеют еще меньшие размеры. Они надежны в работе при значительном увеличении срока службы без ремонта и замены деталей.

Схема наиболее распространенного в настоящее время усилителя для электронных потенциометров приведена на рис. 3. 30, на котором показана также схема реверсивного двигателя.

Электронный усилитель имеет три каскада усиления напряжения и один каскад усиления мощности входного сигнала. Кроме того, имеется однополупериодный кенотронный выпрямитель для питания анодных цепей каскадов усиления напряжения.

Входной сигнал — напряжение небаланса от измерительной части схемы (на рис. 3. 30 не показана) поступает к вибропреобразователю *Вп* и входному трансформатору $Тр_1$. Во вторичной обмотке входного трансформатора возникает переменное напряжение с частотой 50 *гц*, по величине превышающее напряжение входного сигнала за счет коэффициента трансформации. Со вторичной обмотки входного трансформатора напряжение передается на сетку первой половины лампы $Л_1$, образующей первый каскад усиления напряжения. Конденсатор C_1 служит для настройки вторичной обмотки на частоту 50 *гц* и для задержания высших гармоник переменного напряжения, которые образуются в ней из-за несинусоидальной формы

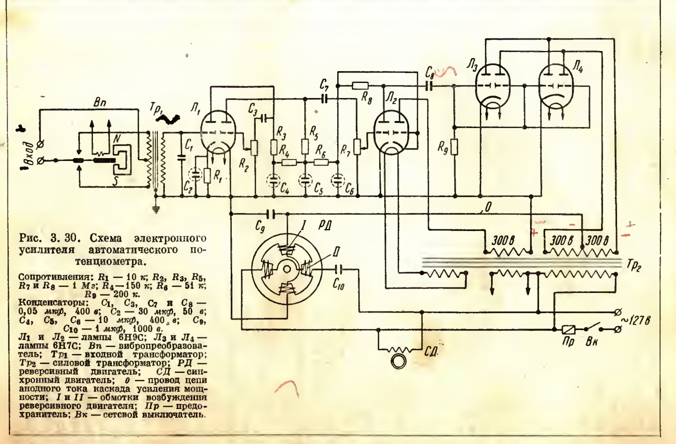


Рис. 3. 30. Схема электронного усилителя автоматического потенциометра.

Сопротивления: R_1 — 10 *к*; R_2, R_3, R_5, R_7 и R_8 — 1 *Мг*; R_4 — 150 *к*; R_6 — 51 *к*; R_9 — 200 *к*.

Конденсаторы: C_1, C_3, C_7 и C_8 — 0,05 *мкф*, 400 *в*; C_2 — 30 *мкф*, 50 *в*; C_4, C_5, C_6 — 10 *мкф*, 400 *в*; C_9, C_{10} — 1 *мкф*, 1000 *в*.

$Л_1$ и $Л_2$ — лампы 6Н9С; $Л_3$ и $Л_4$ — лампы 6Н7С; *Вп* — вибропреобразователь; $Тр_1$ — входной трансформатор; $Тр_2$ — силовой трансформатор; *РД* — реверсивный двигатель; *СД* — синхронный двигатель; *0* — провод цепи анодного тока каскада усиления мощности; *I* и *II* — обмотки возбуждения реверсивного двигателя; *Пр* — предохранитель; *Вк* — сетевой выключатель.

токов, протекающих к первичной обмотке входного трансформатора. Вторая половина лампы $Л_1$ и первая половина лампы $Л_2$ используются как второй и третий каскады усиления напряжения. Вторая половина лампы $Л_2$ используется как однополупериодный кенотронный усилитель. Каскады усиления напряжения имеют реостатно-емкостную связь. На сетку лампы первого каскада усиления подается отрицательное напряжение смещения при помощи сопротивления R_1, зашунтированного конденсатором C_2. Конденсаторы C_3, C_7 и C_8 — разделительные. Сопротивления R_3, R_5 и R_8 — нагрузочные первого, второго и третьего каскадов. Переменные сопротивления R_2 и R_7 служат для регулирования степени усиления. При достаточно больших напряжениях небаланса степень усиления уменьшают, чтобы не было вибрации в работе реверсивного двигателя. Сопротивления R_4 и R_6 и конденсаторы C_4 и C_5 образуют развязывающие фильтры первого и второго каскадов усиления.

Конденсатор C_6 служит для сглаживания пульсации выпрямленного тока. Анод правой половины лампы $Л_2$ питается от отдельной обмотки силового трансформатора $Тр_2$ переменным напряжением 300 *в*. Общий коэффициент усиления трех каскадов усиления напряжения с учетом коэффициента трансформации входного трансформатора составляет около $1 \cdot 10^6$.

Усиленное напряжение небаланса через конденсатор C_8 подается на управляющие сетки ламп $Л_3$ и $Л_4$ каскада усиления мощности. Аноды этих ламп соединены попарно и питаются переменным током напряжением 300 *в* от отдельной обмотки силового трансформатора. Сопротивление R_9 является сопротивлением утечки сеток ламп $Л_3$ и $Л_4$.

Каскад усиления мощности усиливает выходной сигнал и изменяет на 180° фазу колебаний анодного тока ламп $Л_3$ и $Л_4$ при изменении полярности напряжения небаланса на входе усилителя. Фазочувствительность каскада — это очень важное свойство, которое используется для создания реверсивного действия двигателя, что, как уже указывалось, необходимо для перемещения движка реохорда к точке баланса измерительной схемы из любого его положения.

Таким образом, выходной величиной электронного усилителя является ток анодной цепи каскада усиления мощности, протекающий по проводу, обозначенному знаком *0*. Этот ток состоит из постоянной и переменной составляющих. Переменная составляющая тока при разбалансе схемы потенциометра имеет частоту 50 *гц*, причем фаза его изменяется на 180° при изменении полярности постоянного напряжения небаланса на входе усилителя. В момент баланса частота переменной составляющей этого тока равна 100 *гц*.

Нити накала ламп $Л_1$, $Л_3$, $Л_4$ и обмотки возбуждения вибропреобразователя питаются переменным током напряжением 6,3 *в* от одной обмотки силового трансформатора. Нить накала лампы $Л_2$

питается от другой обмотки трансформатора током того же напряжения. Такое раздельное питание вызвано высоким напряжением катода правой половины лампы $Л_2$ по отношению к ее нити накала. Если бы все лампы питались от одной накальной обмотки, то не исключена возможность выхода из строя всех остальных ламп усилителя при пробое изоляции между катодом и нитью накала лампы $Л_2$.

Реверсивный двигатель *РД* является асинхронным однофазным конденсаторного типа с короткозамкнутым ротором, мощностью около 10 *вт*. Он имеет две обмотки возбуждения, одна из которых *I* питается анодным током ламп $Л_3$ и $Л_4$, а другая *II* — переменным током частотой 50 *гц* от сети.

Конденсатор C_9 служит для отвода токов высших гармоник от обмотки *I* возбуждения, что улучшает работу двигателя. Конденсатор C_{10} создает сдвиг фазы тока в обмотке *II* на 90° относительно фазы тока в обмотке *I*. Взаимодействием токов равных частот, протекающих по обмоткам возбуждения, создается вращающееся магнитное поле, которое приводит во вращение ротор двигателя. Направление вращения ротора зависит от фазы тока, протекающего по обмотке *I*, которая, как было указано, изменяется на 180° при изменении полярности напряжения небаланса. При балансе схемы потенциометра, когда выходной ток имеет частоту 100 *гц*, ротор двигателя не вращается.

Синхронный двигатель привода диаграммы питается от сети переменного тока.

Электронный усилитель вместе с вибропреобразователем и входным трансформатором монтируют на одном шасси, они образуют сменный блок потенциометра. Реверсивный и синхронный двигатели устанавливают отдельно от усилителя.

Наиболее уязвимой деталью электронного потенциометра является реохорд. Его обмотка с течением времени истирается движком и изменяет свое сопротивление. Реохорды не могут быть полностью защищены от вредного воздействия внешней среды, в которой могут содержаться сернистые газы, вызывающие коррозию, вследствие чего нарушается контакт обмотки с движком. Все это приводит к увеличению погрешности прибора. Кроме того, как уже указывалось, ограничение величины напряжения на входе электронного усилителя падением потенциала на одном витке реохорда не позволяет еще больше повышать чувствительность потенциометра. Это побудило приборостроителей создать потенциометр без реохорда.

В этом потенциометре компенсирующее напряжение получается от мостовой схемы, состоящей из четырех тензоэлементов. Напряжение небаланса, усиливаемое электронным усилителем, управляет вращением ротора реверсивного двигателя, который воздействует на тензоэлементы и изменяет величину компенсирующего напряжения до значения, соответствующего балансу схемы. Принципиальная

укрупненная схема измерительной части и схема кинематического механизма такого потенциометра показаны на рис. 3. 31. Тензоэлементы R_1, R_2, R_3 и R_4 выполнены из металлических проводов, натянутых между поворотным валом *2* и опорной рамой *1*, и образуют мост сопротивления. При помощи секторной передачи *3* сравнительно большой угол поворота вала реверсивного двигателя *РД* преобразуется в малый угол поворота вала *2* очень точно, без люфта. При

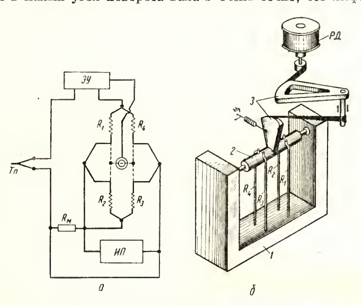


Рис. 3. 31. Потенциометр без реохорда.

а — упрощенная электрическая схема; *б* — схема кинематического механизма; *1* — опорная рама; *2* — поворотный вал; *3* — секторная передача; *Тп* — термопара; *ЭУ* — электронный усилитель; *РД* — реверсивный двигатель; *ИП* — источник питания; R_1, R_2, R_3 и R_4 — тензоэлементы; $R_м$ — сопротивление холодного спая.

разбалансе схемы вращение вала двигателя изменяет степень натяжения тензоэлементов, причем два из них, например R_1 и R_3, одновременно растягиваются, а два других R_2 и R_4 сжимаются. В результате при неизменном общем сопротивлении моста создается требуемое компенсирующее напряжение.

Поправка на температуру холодного спая термопары вносится при помощи термочувствительного сопротивления $R_м$, включенного в цепь термопары. Через это сопротивление непрерывно протекает ток от источника питания *ИП*, образующий на нем напряжение, которое суммируется с э. д. с. термопары. Сопротивление $R_м$ расположено у холодного спая термопары внутри кожуха прибора. При колебаниях его температуры изменяется величина напряжения на

его концах и соответственно увеличивается или уменьшается э. д. с. термопары на величину поправки.

Схема моста из тензоэлементов питается от источника питания *ИП*, выполненного на полупроводниках с высокой степенью стабилизации напряжения, благодаря чему отпадает необходимость в нормальном элементе. Новые потенциометры могут иметь очень узкие пределы измерения до 0,1 *мв*; погрешность составляет $\pm 0{,}25\%$ от диапазона шкалы. Чувствительность их гораздо выше, чем у потенциометров с реохордом, и определяется в основном чувствительностью электронного усилителя. Последний собран на полупроводниковых элементах и имеет малые размеры.

Электропневматический датчик температуры

Под таким названием выпускается прибор, который может быть использован в системах контроля и регулирования температуры. Датчик состоит из электронного преобразователя, электропневматического преобразователя и температурного компенсатора.

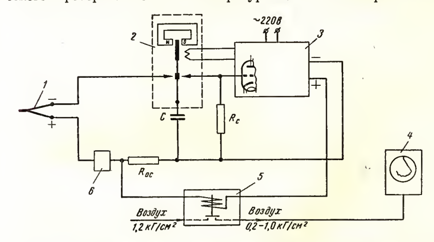


Рис. 3. 32. Укрупненная схема электропневматического датчика температуры.

1 — термопара; 2 — вибропреобразователь; 3 — электронный усилитель; 4 — вторичный прибор; 5 — электропневматический преобразователь; 6 — температурный компенсатор; $R_с$ — сопротивление в цепи сетки первой усилительной лампы; $R_{ос}$ — сопротивление обратной связи; C — конденсатор.

Электронный преобразователь преобразует э. д. с. термопары в пропорциональную величину постоянного тока. Э. д. с. термопары измеряется компенсационным методом. На сопротивлении $R_{ос}$ (рис. 3. 32) постоянным током с выхода электронного усилителя создается компенсирующая разность потенциалов. В цепь напряжения небаланса включены вибропреобразователь 2 и конденсатор C.

При замыкании левого контакта вибропреобразователя конденсатор заряжается под действием напряжения небаланса, при последующем замыкании правого контакта он разряжается через сопротивление R_c. При разрядке конденсатора на сетку первой лампы электронного усилителя подается напряжение, пропорциональное напряжению небаланса. Пластина, замыкающая контакты, вибрирует с частотой 50 *гц*, и благодаря этому переменное напряжение, подаваемое на сетку лампы, имеет такую же частоту. Выходной величиной электронного усилителя является постоянный ток, который в зависимости от э. д. с. термопары пропорционально изменяется в пределах 0—5 *ма*. Этот ток питает электропневматический преобразователь, включенный во внешнюю цепь, и проходит через сопротивление R_{cc} обратной связи.

Если, например, вследствие изменения температуры э. д. с. термопары увеличивается, то увеличивается напряжение небаланса, поступающее на сетку первой лампы.

Это вызывает увеличение тока на выходе усилителя и, следовательно, увеличение компенсирующего напряжения на сопротивлении R_{oc}, что в свою очередь приводит к уменьшению напряжения небаланса и к прекращению роста выходного тока. Аналогично протекает процесс и при понижении э. д. с. термопары, но в обратном порядке. Таким образом, каждому значению э. д. с. термопары в определенных установленных пределах в зависимости от выбранного диапазона измерения соответствует строго постоянная величина выходного тока.

Схема электронного усилителя этого прибора сложнее схемы усилителя электронных потенциометров. Она состоит из четырех каскадов усиления переменного напряжения небаланса, фазочувствительного выпрямительного каскада и двух каскадов усиления постоянного тока. Подробного описания этой схемы здесь не приводится.

В электропневматическом преобразователе выходной ток электронного преобразователя в свою очередь преобразовывается в пропорциональное давление сжатого воздуха, которое передается по трубке вторичному прибору.

Электронный и электропневматический преобразователи не имеют шкал, и показания берутся лишь по шкале вторичного прибора, градуированного в градусах температуры. В цепь выходного тока может быть включен и электрический прибор или с некоторыми небольшими дополнениями электронный самопишущий потенциометр.

Входной величиной электропневматического преобразователя является постоянный ток от электронного преобразователя, протекающий через катушку возбуждения *7* (рис. 3. 33). Катушка подвешена к рычагу *8*, в зазоре постоянного магнита *16*. Рычаг *8*, имеющий опору *9*, уравновешен грузом *10*. На левом конце рычага находится заслонка *6* в виде небольшой металлической пластинки. Вблизи

заслонки, снизу, расположено сопло *5* пневматического усилителя *1*.

Пневматический усилитель *1* питается сжатым воздухом давлением 1,2 *кГ/см²*. Часть воздуха через постоянный дроссель *3* направляется в камеру над мембраной *2* и по трубке *4* к соплу *5*. Другая основная часть воздуха поступает в камеру над шариковым клапаном мембраны *2*. Когда сопло открыто, то мембрана находится в раз-

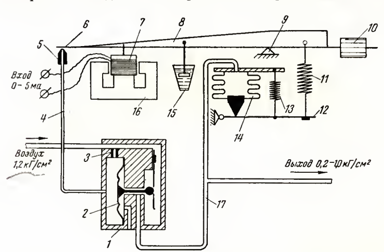


Рис. 3. 33. Схема электропневматического преобразователя.

1 — пневматический усилитель; *2* — мембрана; *3* — постоянный дроссель; *4* — трубка; *5* — сопло; *6* — заслонка; *7* — катушка возбуждения; *8* — главный рычаг; *9* — опоры; *10* — груз; *11* — пружина обратной связи; *12* — гибкая пластина; *13* — регулировочная пружина; *14* — сильфон обратной связи; *15* — демпфер; *16* — постоянный магнит; *17* — линия выхода воздуха.

жатом состоянии, шариковый клапан прикрыт, а конусный открыт, полость под мембраной сообщается с атмосферой и в линии выхода давление падает до атмосферного. Если же заслонка прикроет сопло, то давление над мембраной *2* повышается, клапаны перемещаются вправо, сообщение с атмосферой перекрывается и давление в линии выхода *17* повышается.

Действие катушки возбуждения сводится к изменениям положения заслонки относительно сопла. Для создания пропорциональности между изменениями тока в катушке и давлением воздуха на выходе применен сильфон *14*, выполняющий работу звена обратной связи. При увеличении тока катушка втягивается в зазор магнита и заслонка прикрывает сопло. Одновременно увеличивается выходное давление, которое передается в сильфон обратной связи. Последний разжимается и через пружину *11* перемещает правый конец рычага *8* вниз. От этого заслонка снова отводится от сопла. При умень-

шении тока катушка приподнимается и выходное давление уменьшается. Каждому значению тока в катушке отвечает строго определенное значение выходного давления в пределах 0,2—1,0 *кГ/см²*.

Как видно, действие электропневматического преобразователя основано на компенсации момента силы, действующего на рычаг *8* со стороны катушки, моментом силы со стороны пружины *11*, действующей на правый конец рычага. В результате взаимодействия этих моментов перемещение рычага очень невелики. Для подавления возможных колебаний рычага предусмотрен жидкостный демпфер *15*.

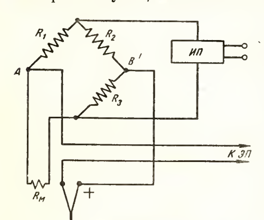


Рис. 3. 34. Схема температурного компенсатора.

R_1, R_2 и R_3 — постоянные сопротивления из манганина; $R_м$ — термочувствительное сопротивление, медное; *ИП* — источник питания; *ЭП* — электронный преобразователь; *А* и *В* — вершины моста.

Температурный компенсатор предназначен для введения поправки на температуру холодного спая термопары. Электрическая схема компенсатора (рис. 3. 34) состоит из моста сопротивлений и источника питания. Три сопротивления R_1, R_2 и R_3 моста изготовлены из манганиновой проволоки и не изменяют своей величины от температуры. Сопротивление $R_м$ медное, оно изменяет свою величину при колебаниях температуры.

Располагается сопротивление $R_м$ рядом с клеммами для подключения компенсационных проводов, благодаря чему его температура всегда равна температуре холодного спая термопары. Питается мост постоянным током напряжением около 100 *в* от стабилизированного источника питания *ИП*.

Мост включен в цепь термопары, и напряжение на его вершинах *А* и *В* суммируется с э. д. с. термопары. При температуре холодного спая 0° С мост уравновешен, потенциалы точек *А* и *В* равны и поправка не вносится. При увеличении температуры холодного спая э. д. с. термопары уменьшается, но одновременно увеличивается напряжение между точками *А* и *В*, которое и компенсирует это уменьшение.

Все три описанные основные узлы электропневматического датчика температуры смонтированы в общем кожухе. В качестве вторичного прибора используется показывающий или самопишущий манометр с пределами измерения 0,2—1 *кГ/см²*, шкала которого градуирована в градусах температуры.

Величина постоянной времени термоэлектрических пирометров зависит в основном от термопары. Чем толще термоэлектроды и защитная трубка, тем больше постоянная времени. Для промышленных термопар, установленных в потоке газа или воздуха, постоянные времени имеют следующие примерные значения: без защитной трубки 0,6 *мин*; в фарфоровой защитной трубке 1,7 *мин*; в стальной защитной трубке 2 *мин*. В движущейся жидкой среде постоянная времени термопары меньше в 2—2,5 раза, чем в газовой среде.

Постоянная времени электронных потенциометров сравнительно мала и составляет от десятых долей секунды до нескольких секунд в зависимости от быстродействия записывающего устройства.

§ 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Этот вид приборов для измерения температуры основан на свойстве металлических проводников изменять свое сопротивление от изменения их температуры. Свойство это характеризуется температурным коэффициентом сопротивления α, величина которого определяется уравнением

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 100} \ 1/град, \qquad (3.24)$$

где R_{100} и R_0 — сопротивления проводника при температуре 100 и 0° С.

Величина α показывает, во сколько раз увеличивается сопротивление проводника при повышении его температуры на один градус. Для большинства чистых металлов коэффициент положителен и приблизительно равен 0,004 1/*град*, для железа и никеля около 0,0064 1/*град*. Некоторые сплавы имеют очень маленький коэффициент α. Так, например, манганин 0,000006 1/*град*, константан 0,00004 1/*град* и т. д.

Характеристика металлического проводника, выражающая зависимость между его сопротивлением и температурой, хотя и не вполне линейна, но постоянна. Это дает возможность по величине сопротивления проводника определять его температуру.

В последнее время в качестве термочувствительных элементов используются полупроводниковые сопротивления. Их коэффициент α в 8—10 раз больше, чем у металлов, и отрицателен. С увеличением температуры сопротивления полупроводника уменьшается. Благодаря высокому коэффициенту α полупроводниковые элементы имеют гораздо бо́льшую чувствительность. Однако их характеристики не отличаются постоянством, что является их недостатком. Полупроводниковые термометры сопротивления пока еще не применяются для контроля технологических процессов нефтепереработки, поэтому они здесь не рассматриваются.

Металлы, из которых изготовляют термометры сопротивления, должны иметь по возможности большой температурный коэффициент

сопротивления, иметь близкую к линейной характеристику и быть стойкими к воздействию внешней среды.

Наибольшее распространение получили платиновые, медные и никелевые термометры сопротивления.

Термометр сопротивления выполняется в виде небольшой катушки или пластинки с обмоткой из тонкой проволоки (рис. 3. 35).

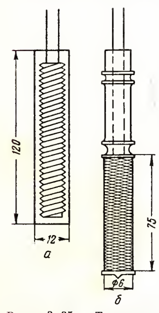


Рис. 3. 35. Термометры сопротивления без защитных трубок.

а — обмотка на плоском слюдяном каркасе; *б* — обмотка на круглом эбонитовом каркасе.

Изготовляют также термометры с открытой обмоткой на трехгранном каркасе с обмотками, запаянными в кварцевое стекло, и другие. Для защиты от внешних воздействий термометр помещают в защитную трубку, его выводы изолируют фарфоровыми изоляторами и подсоединяют к клеммам на небольшой панельке, образующей головку термометра. По внешнему виду технические термометры сопротивления в защитных трубках очень похожи на термопары. Сопротивление термометра измеряется специальным прибором, соединенным с ним медными проводами. Прибор можно устанавливать на достаточно большом расстоянии от термометра. Шкала прибора градуируется в градусах температуры.

В СССР для технических измерений выпускаются платиновые и медные термометры сопротивления.

Платиновыми термометрами сопротивления можно измерить температуру от -200 до $+650°$ С. Их выпускают эталонными, образцовыми и рабочими. Эталонный платиновый термометр применяют также для поверки и градуировки образцовых термометров сопротивления. Образцовыми платиновыми термометрами сопротивления поверяют и градуируют многие другие рабочие приборы для измерения температуры.

Для изготовления термометров сопротивления применяют платиновую проволоку диаметром 0,05—0,07 *мм* или ленту сечением $0{,}1 \times 0{,}02$ *мм* без изоляции. Температурный коэффициент платины $\alpha \approx 0{,}0039$ 1/*град*. Удельное сопротивление $\varrho \approx 0{,}1$ *ом* · *мм*²/*м*. Зависимость сопротивления платины от температуры в интервале от 0 до $+650°$ С выражается уравнением

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \tag{3.25}$$

и для интервала от 0 до $-200°$ С

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)], \tag{3.26}$$

где R_t и R_0 — сопротивления термометра при температурах t и 0° С;
A, B и C — постоянные коэффициенты.

Для чистой платины

$$A = 3{,}968 \cdot 10^{-3}\ 1/град; \quad B = -5{,}847 \cdot 10^{-7}\ 1/град^2;$$
$$C = -4{,}22 \cdot 10^{-12}\ 1/град^4.$$

Чистота платины характеризуется величиной отношения $\frac{R_{100}}{R_0}$, где R_{100} — сопротивление при температуре 100° С. Чем больше это отношение, тем чище платина.

Для эталонных термометров применяют платину с отношением $\frac{R_{100}}{R_0} > 1{,}392$, для технических $\frac{R_{100}}{R_0}$ от 1,385 до 1,390.

Технические платиновые термометры изготовляют обычно с обмоткой на слюдяной пластинке или в виде небольшой цилиндрической спирали, запаянной в кварцевое стекло.

Характеристики технических платиновых термометров сопротивления, выпускаемых в СССР в виде градуировочных таблиц, приведены в приложениях 4 и 5.

Технические медные термометры сопротивления изготовляют из медной в эмалевой изоляции проволоки диаметром 0,1 *мм*, намотанной на круглый эбонитовый каркас. Температурный коэффициент сопротивления меди в интервале от —50 до +150° С равен от 0,00425 до 0,00428 *1/град*. Удельное сопротивление меди $\rho = 0{,}017$ *ом · мм²/м*. Сопротивление термометра в указанных пределах температур изменяется по линейной зависимости и может быть определено по формуле

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t). \qquad (3.\ 27)$$

В СССР техническими медными термометрами измеряют температуру в пределах от —50 до +180° С; их характеристика приведена в приложении 6.

Никелевые термометры сопротивления изготовляют некоторые зарубежные приборостроительные фирмы. В СССР они не выпускаются.

Для измерения сопротивления термометров применяют следующие приборы: уравновешенные и неуравновешенные мосты и логометры.

Уравновешенные мосты

Принципиальная схема моста представлена на рис. 3. 36. Сопротивления R_1, R_2 и R_3 должны быть известными. Неизвестным является сопротивление R_t термометра. Мост питается постоянным током напряжением 1,5—4 *в* от батареи *Б* из одного или нескольких сухих элементов. В диагональ *AB* моста включен нуль-гальвано-

метр *НГ*. Для равновесия моста, когда потенциалы в точках *А* и *В* равны и ток через нуль-гальванометр не протекает, необходимо, чтобы величины сопротивлений плеч удовлетворяли условию

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_t}. \tag{3.28}$$

Величину R_t измеряемого сопротивления подсчитывают по уравнению

$$R_t = R_3 \frac{R_2}{R_1}. \tag{3.29}$$

Если величина R_t изменяется, то равновесие моста будет нарушаться. Для восстановления равновесия необходимо изменить одно из трех известных или соотношение двух сопротивлений.

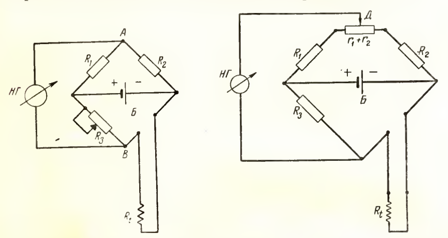


Рис. 3. 36. Схема моста для измерения сопротивления.

Рис. 3. 37. Схема моста для измерения сопротивления с изменением соотношения двух плеч.

На рис. 3. 36 изображен мост, для уравновешивания которого требуется изменять переменное сопротивление R_3. Стрелка нуль-гальванометра не должна отклоняться, когда мост уравновешен.

Большее распространение получили схемы с изменением отношений сопротивлений двух плеч моста (рис. 3. 37). В одну из вершин моста включено дополнительное сопротивление. Часть r_1 этого сопротивления входит в плечо R_1, а другая r_2 в плечо R_2. Равновесие моста восстанавливается передвижением движка *Д*. При равновесии моста сопротивление термометра определяется из уравнения

$$R_t = R_3 \frac{R_2 + r_2}{R_1 + r_1}. \tag{3.30}$$

Как видно из схемы, сумма сопротивлений двух смежных плеч остается постоянной, а изменяется лишь их соотношение.

Преимущество схем уравновешенных мостов состоит в том, что на их показания не влияет изменение величины напряжения источника питания в достаточно широких пределах.

Величина сопротивления соединительных проводов и его изменения от температуры влияют на показания моста, так как это сопротивление входит в состав плеча с термометром. Шкалу прибора градуируют при определенной величине сопротивления соединительных проводов. Для уменьшения влияния изменения сопротивления соединительных проводов применяют трехпроводную схему включения термометра (рис. 3. 38). Третьим является провод от источника питания, точка подключения которого перенесена к термометру R_t. Вследствие этого сопротивление одного из соединительных проводов суммируется с сопротивлением термометра, а другого с сопротивлением R_2.

Для подгонки величины сопротивления соединительных проводов до градуировочного значения служат добавочные сопротивления $r_д$.

Рис. 3. 38. Схема моста для измерения сопротивления с трехпроводным включением термометра.

Большее распространение получили автоматические электронные мосты, в которых индикатором равновесия моста является электронный усилитель (рис. 3. 39). Постоянное напряжение небаланса моста подается к вибропреобразователю и входному трансформатору, где оно преобразуется в переменное с частотой 50 *гц* и откуда поступает на вход электронного усилителя. Усиленное переменное напряжение небаланса управляет работой реверсивного электродвигателя, ротор которого при вращении перемещает движок реохорда в сторону баланса моста и одновременно указатель и стрелку с пером прибора. Детали моста — вибропреобразователь, входной трансформатор, электронный усилитель, реверсивный и синхронный электродвигатели — точно такие же, как и в описанном ранее электронном потенциометре.

Выпускаются также уравновешенные электронные мосты, которые питаются переменным током напряжением 6,3 *в*, частотой 50 *гц* от обмотки силового трансформатора электронного усилителя. В таких мостах вибропреобразователь отсутствует,

а в остальном они не отличаются от мостов постоянного тока.

Термометры сопротивления, питаемые переменным током, считаются взрывоопасными, поскольку из-за сравнительно большой мощности их источника питания при разрыве цепи термометра может образоваться искра.

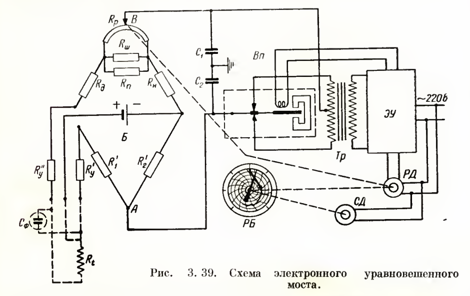


Рис. 3. 39. Схема электронного уравновешенного моста.

R_1' и R_2' — сопротивления постоянных плеч моста; $R_н$ — сопротивление для подгонки начала шкалы; $R_п$ — сопротивление для подгонки диапазона шкалы; $R_р$ — сопротивление реохорда; $R_д$ — ограничительное сопротивление; $R_ш$ — шунт реохорда; $R_у'$ и $R_у''$ — подгоночные сопротивления внешних проводов; R_t — сопротивление термометра; $C_ф$ — конденсатор фильтра; C_1 и C_2 — блокирующие конденсаторы; *Вп* — вибропреобразователь; *Тр* — входной трансформатор; *ЭУ* — электронный усилитель; *РД* — реверсивный двигатель; *СД* — синхронный двигатель для привода диаграммы; *РБ* — регистрирующий блок; *Б* — батарея из одного сухого элемента 1,5 *в*; *АВ* — вершины моста.

Погрешность мостов постоянного и переменного тока ±0,5% от диапазона шкалы. Выпускаются они в различных модификациях: показывающими, самопишущими, регулирующими крупно- и малогабаритными и др. Градуируют мосты для определенного типа термометра и на разные пределы измерения от —200 до +650° С. В качестве источников питания мостов постоянного тока используют сухие элементы.

Неуравновешенные мосты

Неуравновешенные мосты — приборы, в которых сопротивление термометра измеряется при неуравновешенном состоянии моста. В них постоянное напряжение небаланса измеряется магнитоэлек-

трическим гальванометром со шкалой, градуированной в градусах температуры. При положении стрелки на нижнем пределе измерения, что соответствует минимальному сопротивлению термометра, мост находится в равновесии. При увеличении сопротивления термометра от повышения температуры равновесие моста нарушается, увеличивается напряжение небаланса и стрелка гальванометра отклоняется в сторону верхнего предела измерения.

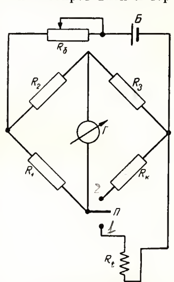


Рис. 3. 40. Схема неуравновешенного моста.

В схеме неуравновешенного моста (рис. 3. 40) сопротивления всех плеч моста, кроме плеча с термометром, постоянны. На показания такого моста влияет величина напряжения питания. Для проверки напряжения питания в схеме предусмотрены сопротивление $R_к$ и переключатель $П$. Проверяется напряжение питания периодически, для чего переключатель $П$ замыкается с $R_к$ и термометр R_t отключается. Состоит неуравновешенный мост из четырех сопротивлений: R_1, R_2, R_3 и $R_к$. Напряжение небаланса при постоянных значениях этих сопротивлений и определенном напряжении питания должно иметь строго постоянное значение, которое отмечается красной чертой на шкале гальванометра. Если от изменения напряжения источника питания $Б$ при проверке стрелка гальванометра $Г$ не устанавливается на красную черту, то ее подводят к черте подрегулировкой реостата батареи $R_б$. После проверки переключателем $П$ отключается сопротивление $R_к$ и вместо него включается сопротивление термометра R_t.

Приборы для измерения температуры, работающие по схеме неуравновешенного моста, в настоящее время в промышленности почти не применяются.

Логометры

Логометр — магнитоэлектрический прибор, у которого в зазоре между магнитными полюсами и сердечником находится подвижная рамка, состоящая из двух самостоятельных обмоток, скрепленных между собой под углом. Сердечник магнита имеет круглое сечение. Полюсные наконечники имеют такую форму, которая образует зазор овальной формы (рис. 3. 41) для создания неравномерного магнитного поля. Существуют логометры, в которых для создания неравномерного магнитного поля применяют

сердечник овальной формы, полюсные наконечники имеют круглые вырезы.

Ток от источника питания разветвляется на две цепи — термометра R_t и постоянного сопротивления R. В каждую цепь включено по одной обмотке подвижной рамки. Направление токов в обмотках таково, что рамки стремятся повернуться в противоположных направлениях.

Величина R подбирается такой, чтобы при температуре нижнего предела измерения рамка устанавливала стрелку на отметку нижнего предела шкалы. При увеличении температуры сопротивление термометра возрастет, сила тока в обмотке его рамки уменьшается

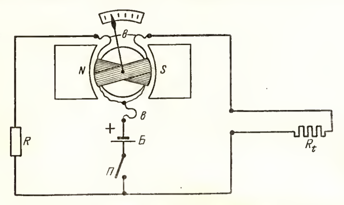


Рис. 3. 41. Принципиальная схема логометра.

N и S — полюса постоянного магнита; *в* — безмоментные вводы; R — постоянное сопротивление; R_t — термометр сопротивления; $Б$ — источник питания, 4 *в*; $П$ — выключатель.

и стрелка перемещается к верхнему пределу. При конечном увеличении или уменьшении измеряемой температуры рамка, повернувшись на некоторый угол, останавливается, так как моменты обмоток уравновешиваются за счет перемещения одной из области более сильного магнитного поля в слабое и другой из области слабого поля в более сильное.

Логометр измеряет отношение токов, поэтому на его показания не влияют колебания напряжения источника питания в достаточно широких пределах. Рамка логометра не имеет спиральных пружинок. Ток к обмоткам рамки подводится по трем тонким серебряным нитям, не создающим противодействующего уравновешивающего момента. Однако упругость этих нитей подбирается такой, чтобы при отсутствии питания стрелка возвращалась к отметке нижнего предела шкалы.

На рис. 3. 42 приведена практическая схема логометра для промышленных измерений температуры. Для уменьшения

влияния изменения сопротивления соединительных проводов применена трехпроводная схема включения термометра R_t. Сопротивления $R'_у$ и $R_у$ служат для подгонки величины сопротивления соединительных проводов термометра до градуированного значения. Сопротивление $R_к$ — контрольное, его включают при подгонке сопротивления проводов термометра. Для включения сопротивления $R_к$ клеммы термометра закорачивают и сопротивление $R_у$ одним концом подключают к свободной клемме сопротивления $R_к$. При включении $R_к$ стрелка логометра должна установиться на красную черту, нанесенную на шкале. Обмотки $R_р$ и $R'_р$ рамки включены в диагональ ab неуравновешенного моста, образованного сопротивлениями R_2, R_3, $R_1 + R'_у$ и $R_6 + R_t + R_у$, причем $R_2 = R_3$. Питание от источника $Б$ напряжением около 4 *в* подается к диагонали cd моста. Между точкой e и вершиной c включены постоянное манганиновое сопротивление R_4 и сопротивление R_5 из медной проволоки.

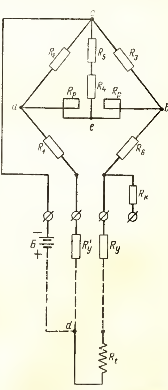


Рис. 3. 42. Рабочая схема промышленного логометра.

Величины сопротивлений плеч рассчитаны так, что мост находится в равновесии при сопротивлении R_t термометра, соответствующем температуре середины шкалы. При этом токи в обмотках $R_р$ и $R'_р$ рамки равны между собой и указатель находится в среднем положении шкалы. При дальнейшем увеличении температуры сопротивление R_t увеличивается, равновесие моста нарушается, ток в обмотке $R'_р$ уменьшается, а в обмотке $R_р$ увеличивается, рамка перемещает указатель вверх по шкале. При понижении температуры сопротивление термометра уменьшается, ток в обмотке $R'_р$ увеличивается, а в обмотке $R_р$ уменьшается и рамка поворачивается в обратном направлении, перемещая указатель к нижнему пределу шкалы.

Сопротивление R_4 служит для подгонки диапазона шкалы. Медное сопротивление R_5 чувствительно к изменениям температуры. Оно предназначено для компенсации ошибки, возникающей от изменения сопротивления обмоток рамки при отклонении температуры от градуированного значения.

Погрешность технических логометров ±1,5% от диапазона шкалы.

Схемы логометров питаются постоянным током от аккумуляторных батарей или от специальных выпрямителей переменного тока.

Постоянная времени термометров сопротивления больше, чем у термопар, и зависит от их конструкции, устройства защитной трубки и от характера и состояния измеряемой среды. Для промышленных термометров сопротивления постоянная времени приблизительно равна: с защитной трубкой в движущейся жидкости 0,7 *мин*, в движущемся воздухе или газе до 10 *мин*. Термометры без защитной трубки в промышленных условиях не применяют. Постоянная времени электронных мостов и логометров сравнительно невелика и составляет от десятых долей секунды до нескольких секунд в зависимости от их конструктивных качеств.

§ 7. ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ УСТАНОВКИ ТЕРМОПРИЕМНИКОВ

Величина погрешности измерения температуры зависит не только от погрешности измерительного прибора, но и от того, насколько близка к температуре среды температура термоприемника — термобаллона, термопары или термометра сопротивления. При промышленных измерениях термоприемники всех видов защищаются от воздействия среды трубками, по которым в силу их теплопроводности тепло отводится от горячего конца к холодному. В атмосфере горячих газов тепло, получаемое от среды, кроме отвода за счет теплопроводности, еще излучается термоприемником и передается более холодным близлежащим поверхностям стенок трубопровода или какого-либо другого тела. Практически очень трудно создать такие условия теплопередачи, при которых температура термоприемника была бы в точности равна температуре среды. Между температурами среды и защитной трубки, а следовательно, и термоприемника в месте измерения всегда имеется разница. Поскольку измерительный прибор показывает температуру термоприемника, то эта разница создает дополнительную погрешность в измерении.

На технологических установках измеряют главным образом температуру жидкостей, паров и газов, протекающих по трубопроводам и через различные аппараты, а также температуру дымовых газов в топках печей.

В большинстве случаев вследствие высоких давлений и температуры измеряемой среды защитная трубка для прочности имеет сравнительно большую толщину стенок. Часто из-за незначительного диаметра трубопровода длина трубки небольшая и бо́льшая часть ее выступает наружу.

В целях удлинения срока службы термопар увеличивают толщину термоэлектродов, из-за чего возрастает отвод тепла от горячего спая вследствие теплопроводности.

Все это создает неблагоприятные условия для нагрева термоприемника до температуры среды. Но во всех случаях путем правильной установки защитной трубки можно добиться лучшей теплопередачи, уменьшить разницу между температурой среды и термоприемником и получить более точные результаты измерения. При некоторых допущениях и упрощениях ошибку измерения можно вычислить.

Рассмотрим сначала вычисление ошибки вследствие потери тепла защитной трубкой лучеиспусканием. Допустим, что трубка установлена в газопроводе (рис. 3. 43). Количество тепла q_1, получаемое трубкой диаметром d и длиной l от газа путем конвекции в единицу времени, составит

$$q_1 = \alpha F_т (t_г - t_т), \qquad (3.31)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубки в *ккал/м²·ч·°C*;

$t_г$ — температура газа;

$t_т$ — температура защитной трубки;

$F_т$ — поверхность защитной трубки в *м²*.

Если пренебречь теплом, которое трубка отдает стенке газопровода за счет теплопроводности, потери от лучеиспускания составят

$$q_2 = C_0 \varepsilon_т F_т \left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right], \qquad (3.32)$$

где $\varepsilon_т$ — степень черноты защитной трубки, $0 < \varepsilon_т < 1$;

C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равная 4,96 *ккал/м²·ч·град⁴*;

$T_т$ — абсолютная температура защитной трубки;

T_c — абсолютная температура стенок газопровода.

Рис. 3. 43. Защитная трубка термоприемника в газопроводе.
1 — газопровод; 2 — защитная трубка.

При установившемся тепловом состоянии, если пренебречь потерями тепла за счет теплопроводности, количество тепла, получаемое защитной трубкой, равно количеству тепла, отдаваемому ею, т. е. $q_1 = q_2$.

Исходя из (3. 31) и (3. 32), находим

$$t_г - t_т = C_0 \varepsilon_т \frac{1}{\alpha}\left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right]. \qquad (3.33)$$

Разность ($t_г$ — $t_т$) при неправильной установке защитной трубки может достигать значительной величины. Рассмотрим часто встречающийся на практике случай измерения температуры дымовых газов над перевалом трубчатой печи для подогрева нефти (рис. 3. 44). Температура, измеряемая прибором (на рисунке не показан), 700° С,

температура стенок окружающих труб 330° С. Коэффициент теплоотдачи от газов к трубке примем равным 30 *ккал/м² · ч ·* °С и степень черноты никелевой защитной трубки $\varepsilon = 0{,}06$ (см. приложение 8). Переводя указанные температуры в абсолютные, из (3. 33) имеем

$$t_г - t_т = 4{,}96 \cdot 0{,}06 \frac{1}{30}\left[\left(\frac{973}{100}\right)^4 - \left(\frac{603}{100}\right)^4\right] \approx 76° \text{C}.$$

Следовательно, действительная температура дымовых газов на 76° С выше, чем показанная измерительным прибором. Приведенный пример весьма приближенный. Фактическая средняя температура предметов, окружающих защитную трубку, выше принятой температуры стенок труб за счет накаленной кладки перевальной и боковых стен печи. Но тем не менее ошибка эта существует, и прибор всегда дает заниженные показания.

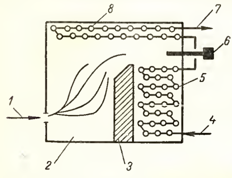


Рис. 3. 44. Установка термопары при измерении температуры над перевалом трубчатой печи для подогрева нефти.

1 — форсунка; 2 — камера сгорания; 3 — перевальная стенка; 4 — линия входа нефти; 5 — трубы конвекционной секции; 6 — термопара; 7 — линия выхода нефти; 8 — трубы радиантной секции.

Из уравнения (3. 33) следует, что для снижения разности ($t_г - t_т$) следует уменьшить $\varepsilon_т$ и разность температур $T_т$ и $T_с$, а также увеличить α. Практически в некоторых случаях это достигается применением защитной трубки из светлого металла (например, из никелевого сплава или нержавеющей стали) с полированной поверхностью, установкой защитной трубки в месте наибольшей скорости газа и увеличением температуры стенок газопровода путем покрытия его тепловой изоляцией. Защитную трубку нужно устанавливать по линии центра газопровода. Если позволяют условия, то желательно для повышения скорости потока сузить трубопровод в месте установки защитной трубки. При очень высоких скоростях газа (около 200 *м/сек*) начинает сказываться влияние перехода кинетической энергии газа в тепловую за счет резкого торможения, что приводит к завышению показаний. Но в нефтезаводской практике такие скорости газа встречаются редко, поэтому подробно этот вопрос здесь не рассматривается.

Для получения более точных результатов при измерениях температуры газовых потоков применяют дополнительные экраны, (рис. 3. 45). Температура стенок экрана выше температуры стенок

газопровода, и благодаря этому уменьшается разность температур.

Вычисление погрешности за счет отвода тепла вследствие теплопроводности ведется так. Если температура газа или жидкости в трубопроводе выше температуры окружающей среды, поток тепла по защитной трубке будет направлен от ее свободного конца к концу, закрепленному в стенке трубопровода (см. рис. 3. 43). Через поперечное сечение защитной трубки протекает количество тепла

$$Q = -\lambda f \frac{dt_т}{dl}, \qquad (3.34)$$

где λ — коэффициент теплопроводности металла трубки в *ккал/м·ч·°C*;

f — площадь поперечного сечения стенок защитной трубки в $м^2$;

$t_т$ — температура стенки трубки на отрезке dl.

Это количество тепла рассеивается в атмосферу и уходит в стенку трубопровода у закрепленного конца защитной трубки.

От вещества, протекающего по трубопроводу, защитная трубка на отрезке dl получает количество тепла

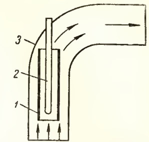


Рис. 3. 45. Установка дополнительного экрана для защитной трубки при измерениях температуры газовых потоков.
1 — экран; 2 — защитная трубка; 3 — газопровод.

$$dQ = \alpha\, d\pi\, dl\, (t_г - t_т), \qquad (3.35)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке защитной трубки в *ккал/м²·ч·°C*;

d — наружный диаметр защитной трубки в *м*;

$t_г$ — температура вещества, протекающего по трубопроводу.

При установившемся тепловом режиме количество тепла, получаемого трубкой, равно количеству тепла, отводимого ею в единицу времени. Из (3. 34) и (3. 35) можно получить дифференциальное уравнение, решение которого с последующими преобразованиями дает следующее уравнение:

$$t_г - t_т = \frac{t_г - t_0}{\mathrm{ch}\left(l\sqrt{\frac{\alpha\pi d}{\lambda f}}\right)}, \qquad (3.36)$$

где t_0 — температура закрепленного конца защитной трубки;

ch — косинус гиперболический; $\mathrm{ch}\, x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$; остальные обозначения прежние.

При выводе уравнения (3. 36) предполагалось, что потери тепла лучеиспусканием отсутствуют. Это справедливо для потока жидкости.

В качестве примера определим разницу $t_г - t_т$ для случая измерения температуры горячего нефтепродукта, протекающего

по трубопроводу (рис. 3. 46). Примем $t_г = 490°$ С, $t_0 = 350°$ С (закрепленный конец защитной трубки не покрыт тепловой изоляцией и сообщается с атмосферой), $l = 0{,}150$ *м*, $d_{наруж} = 0{,}02$ *м*, $d_{внутр} = 0{,}016$, $\alpha = 70$ *ккал/м² · ч* · °С, $\lambda = 39$ *ккал/м · ч* · °С (для стали). Подставляя в (3. 36) числовые значения, получаем

$$t_г - t_т = \frac{490-350}{\mathrm{ch}\left(0{,}15\sqrt{\frac{70\cdot 3{,}14\cdot 0{,}02}{39\cdot 0{,}00011}}\right)} \approx 2{,}3°\,\text{C}.$$

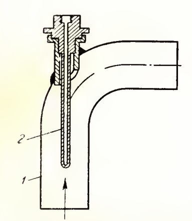


Рис. 3. 46. Установка защитной трубки термоприемника при измерении температуры горячего нефтепродукта.

1 — трубопровод; 2 — защитная трубка.

Отсюда следует, что прибор покажет температуру горячего нефтепродукта на 2,3° С ниже действительной, или 487,7° С.

Этот пример также носит лишь приближенный характер. Однако из него видно, что отвод тепла за счет теплопроводности существенно влияет на температуру термоприемника, понижая ее.

На практике условия теплопередачи иногда значительно ухудшаются из-за отложения на наружной стенке защитной трубки твердых частиц кокса, смол и т. п. Искажение действительной температуры в этих случаях увеличивается.

Из формулы (3. 36) видно, что для достижения наименьшей разницы $t_г - t_т$ необходимо: увеличить температуру t_0, что достигается покрытием трубопровода тепловой изоляцией, включая и бобышку, в которую вставлена защитная трубка; увеличить длину защитной трубки и уменьшить ее диаметр d и площадь сечения; применить защитную трубку из материала с малой теплопроводностью.

При измерении низких температур, когда температура окружающей среды выше измеряемой, поток тепла через защитную трубку направлен от места ее закрепления к рабочему концу. Все приведенные выше положения сохраняют свою силу и для этого случая с той лишь разницей, что рабочий конец будет не охлаждаться, а нагреваться за счет притока тепла из окружающей среды.

§ 8. ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометрами излучения называются приборы для измерения температуры, основанные на измерении энергии, излучаемой нагретыми телами. При температурах до 500° С тела излучают невидимые

инфракрасные или тепловые лучи. С повышением температуры возрастает интенсивность излучения более коротких волн и тела светятся. Одновременно с повышением температуры возрастает и энергия полного или интегрального излучения.

Наибольшей лучеиспускательной способностью обладает абсолютно черное тело. Все физические тела при тех же температурах излучают меньше энергии, чем абсолютно черное тело. Пирометры излучения градуируют по излучению абсолютно черного тела; при измерении температуры физических тел в показания пирометров вносятся соответствующие поправки.

Абсолютно черным называют тело, поверхность которого поглощает все падающие на него лучи. В природе такого тела нет. Реальным воспроизведением абсолютно черного тела может служить небольшое отверстие в замкнутой полости с непрозрачными стенками (рис. 3. 47). Лучи, попавшие в полость вследствие многократного отражения от стенок, практически полностью поглощаются. Если такое тело равномерно нагреть, что через отверстие излучается энергия, которую рассматривают как энергию излучения абсолютно черного тела. В практике к абсолютно черному телу приближается трубка, заделанная в стенку печи, глухое дно которой находится в топочном пространстве и нагревается дымовыми газами.



Рис. 3. 47. Схема поглощения лучей абсолютно черным телом.

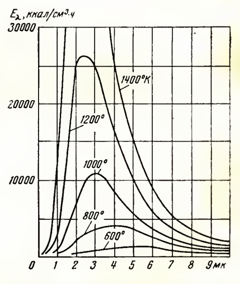


Рис. 3. 48. Спектры излучения абсолютно черного тела при разных температурах.

На рис. 3. 48 приведены графики спектров излучения абсолютно черного тела при различных температурах. По горизонтальной оси отложены длины волн в микронах, а по вертикальной интенсивность излучения E_λ в *ккал/см*^{3} · *ч*. Из рисунка видно, что спектры излучения имеют непрерывный характер и что при одной и той же температуре интенсивность излучения волн различных длин весьма

неодинакова. С повышением температуры интенсивность излучения в области коротких волн растет гораздо быстрее, чем в области длинных волн.

Зависимость интенсивности $E_{\lambda T}$ излучения абсолютно черного тела от температуры и длины волны (монохроматическое излучение) выражается уравнением Планка:

$$E_{\lambda T} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1\right)} \text{ ккал/см}^3 \cdot \text{ч}, \tag{3.37}$$

где $C_1 = 3{,}17 \cdot 10^{-16}$ *ккал/м²·ч* и $C_2 = 1{,}43 \cdot 10^{-2}$ *м*·°K — постоянные величины;

λ — длина волны в *м*;

T — температура в °K;

e — основание натуральных логарифмов.

Измерение интенсивности излучения энергии определенной длины волны (обычно 0,65 *мк*, красный цвет) положено в основу действия оптических пирометров, которые называются еще пирометрами частичного излучения.

Полная энергия излучения абсолютно черного тела при какой-либо определенной температуре определяется уравнением Стефана — Больцмана:

$$E_T = \sigma T^4 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}, \tag{3.38}$$

где E_T — полная энергия излучения абсолютно черного тела;

σ — постоянная излучения абсолютно черного тела, равная $4{,}96 \cdot 10^{-8}$ *ккал/м²·ч·град⁴*.

Измерение полной энергии излучения положено в основу радиационных пирометров, которые называют еще пирометрами полного излучения.

Интенсивность монохроматического излучения растет во много раз быстрее, чем полная энергия излучения при тех же изменениях температуры (рис. 3. 49). При увеличении температуры в два раза от 1000 до 2000° K интенсивность монохроматического излучения возрастает примерно в 2^{16}, в то время как полная энергия излучения возрастает всего в 16 раз. При таком быстром возрастании интенсивности монохроматического излучения даже значительные погрешности ее измерения мало отражаются на точности измерения температур. Поэтому оптические пирометры отличаются меньшей погрешностью измерения, чем радиационные.

Как было указано, физические тела в сравнении с абсолютно черным телом излучают при тех же температурах меньшую энергию.

Связь между этими излучениями выражается уравнениями

$$E'_{\lambda T} = \varepsilon_\lambda E_{\lambda T}, \quad (3.39)$$

$$E'_T = \varepsilon E_T, \quad (3.40)$$

где $E'_{\lambda T}$ — интенсивность монохроматического излучения физического тела;

E'_T — полная энергия излучения физического тела;

ε_λ — коэффициент или степень черноты монохроматического излучения;

ε — коэффициент или степень черноты полного излучения.

Коэффициенты ε_λ и ε больше нуля, но меньше единицы. Их величина зависит от физико-химических свойств тел и от температуры. Определяются эти коэффициенты опытным путем. Значения ε_λ и ε приведены в приложениях 7 и 8.

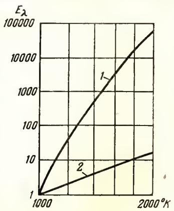
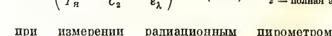


Рис. 3. 49. Возрастание интенсивности монохроматического (для $\lambda = 0{,}65$ *мк*) излучения и полной энергии излучения в зависимости от температуры.

1 — монохроматическое излучение; *2* — полная энергия излучения.

Показания пирометров излучения, градуированных по излучению абсолютно черного тела, при измерениях температуры физических тел всегда занижены. Принято называть температуру физического тела, измеренную оптическим пирометром, **я р к о с т н о й** температурой, а измеренную радиационным пирометром — **р а д и а ц и о н н о й**. Действительную температуру физических тел можно вычислить по формулам:

при измерении оптическим пирометром



$$T = \left(\frac{1}{T_я} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}\right)^{-1} \quad (3.41)$$

и при измерении радиационным пирометром

$$T = T_р \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}, \quad (3.42)$$

где $T_я$ — яркостная температура;

$T_р$ — радиационная температура; остальные обозначения прежние.

Разница между действительной температурой и измеренной пирометрами излучения в зависимости от природы тел может достигать нескольких десятков градусов.

Пирометры излучения удобны тем, что они не требуют контакта с измеряемой средой. Ими можно измерять температуру на большом расстоянии от объекта. В условиях нефтеперерабатывающей промышленности пирометры излучения являются лишь вспомогательными приборами и используются при периодических измерениях температур в топках печей. Более широко они применяются для контроля температуры паровых котлов теплосиловых установок.

Оптический пирометр с исчезающей нитью

Действие пирометра основано на сравнении интенсивности излучения определенной длины волны раскаленного тела с интенсивностью излучения такой же длины волны нити накала небольшой электрической лампы.

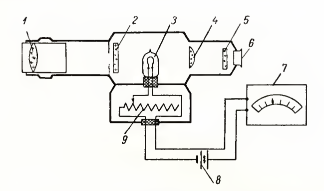


Рис. 3. 50. Схема оптического пирометра.

1 — линза объектива; *2* — серый светофильтр; *3* — лампа накаливания; *4* — окулярная линза; *5* — красный светофильтр; *6* — окуляр; *7* — миллиамперметр; *8* — батарея; *9* — реостат.

Устройство оптического пирометра показано на рис. 3. 50. При измерениях окуляр *6* пирометра подносится к глазу наблюдателя и линза *1* объектива направляется на нагретое тело, температуру которого измеряют. Измерительный прибор — миллиамперметр *7* со шкалой в градусах температуры — располагается вблизи наблюдателя и соединяется с оптическим устройством двухжильным проводом. Питается лампа накаливания *3* током от батареи *8* напряжением 2,5 *в*.

Световые лучи от раскаленного тела линзой объектива фокусируются на нить накала лампы *3*. Перед окуляром расположен красный светофильтр. В поле зрения видна дужка нити накала лампы на красном фоне. Выведенной наружу ручкой движка реостата *9* наблюдатель регулирует ток накала до такого значения, при котором верхняя часть дужки нити исчезает. Это происходит тогда, когда

яркость нити становится равной яркости излучения раскаленного тела в лучах красного цвета. Показания в этот момент отсчитывают по миллиамперметру.

Нить накала из вольфрама допускает нагрев не выше 1400° С, поэтому для измерения более высоких температур в поток света от раскаленного тела вводится серый светофильтр *2*. Последний уменьшает яркость излучения раскаленного тела. Это позволяет измерять температуры выше 1400° С при нагреве нити до температуры, не превышающей 1400° С.

Обычно оптический пирометр имеет две шкалы: одну от 800 до 1400° С без использования серого светофильтра и вторую от 1400 до 2000° С с введением серого светофильтра. Имеются оптические пирометры, которыми можно измерять температуру до 6000° С.

Оптические пирометры — достаточно точные приборы; их погрешность при измерениях температуры тел, приближающихся по своим свойствам к абсолютно черному телу, составляет $\pm 1{,}5\%$ от диапазона шкалы.

Точность измерения снижается от влияния степени отклонения свойств тел от свойств абсолютно черного тела, от поглощения атмосферой лучей той длины волны, на которой производится измерение, от наличия в атмосфере пыли и от загрязнения объектива. Кроме того, на точность измерения могут повлиять субъективные качества наблюдателя.

Расстояние между телом, температура которого измеряется, и оптическим пирометром вследствие лучепоглощения промежуточной средой для промышленных пирометров не должно превышать 5 *м*.

Поправку на отклонение свойств тел от свойств абсолютно черного тела вычисляют по формуле (3. 41). Коэффициент ε_λ находят по таблицам.

Описанный оптический пирометр — переносный прибор. Им нельзя измерять непрерывно и нельзя регистрировать температуру.

Радиационный пирометр

Радиационный пирометр основан на измерении полной энергии излучения нагретого тела. Схема устройства приведена на рис. 3. 51.

Лучи от нагретого тела, пройдя линзу 1 объектива, собираются на поверхности термобатареи *3*. Для правильной установки служит окуляр с линзой *5*. Чтобы снизить вредную для глаза яркость излучения объекта измерения, перед окуляром расположено дымчатое (или красное) стекло. Лучи, падающие на термобатарею, нагревают ее, и в ней возникает з. д. с., пропорциональная по величине полной энергии излучения. Э. д. с. термобатареи измеряется обычным магнитоэлектрическим милливольтметром со шкалой, градуированной в градусах температуры. Правильно установленный радиационный

пирометр может быть закреплен и оставлен для длительного непрерывного измерения температуры. Вместо милливольтметра может быть применен электронный потенциометр самопишущий или показывающий. На рис. 3. 52 приведено устройство термобатареи, состоящей из десяти последовательно соединенных термопар. Горячие спаи термопар расплюснуты, имеют форму треугольника и образуют небольшую по форме, близкую к круглой площадку, на которую падают лучи от нагретого тела. Существуют конструкции термобатарей, расположенных внутри стеклянного баллона, в котором создается вакуум. Термобатареи без баллона имеют меньшую инерционность.

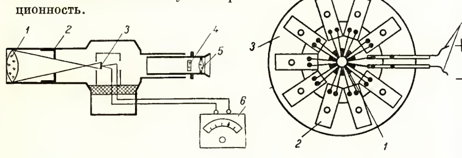


Рис. 3. 51. Схема радиационного пирометра.

1 — линза объектива; *2* — диафрагма; *3* — термобатарея; *4* — дымчатое стекло; *5* — линза окуляра; *6* — милливольтметр.

Рис. 3. 52. Термобатарея радиационного пирометра.

1 — горячие спаи термопар; *2* — контактные пластинки; *3* — слюдяное кольцо; *4* — выводы.

Радиационные пирометры для промышленных измерений выпускаются с пределами измерения от 400 до 2000° С. Погрешность радиационного пирометра при измерении температуры тела, приближающегося по своим свойствам к абсолютно черному телу, при нормальных условиях работы в пределах от 900 до 1800° С составляет от 40 до 50° С, или около 5% от диапазона шкалы.

Нормальными условиями работы пирометра обычно являются следующие: расстояние от объекта излучения до пирометра до 1 *м*; диаметр объекта излучения не меньше $^1/_{20}$ — $^1/_{16}$ расстояния его до пирометра; температура окружающей среды 20 ± 2° С и некоторые другие.

В показания пирометра вносят поправку на отклонение свойств физических тел от свойств абсолютно черного тела путем определения по таблицам величины степени черноты ε полного излучения. Поправку вычисляют по формуле (3. 42). При отклонении условий работы пирометра от нормальных возникают дополнительные погрешности.

§ 9. ПОВЕРКА ТЕРМОПАР И ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Поверка рабочей термопары в электрической печи

Схема установки для поверки термопары приведена на рис. 3. 53. Горячий спай образцовой термопары помещают в фарфоровый колпачок, а поверяемый держат открытым, но близко к спаю образцовой термопары. Спаи не должны касаться стенок печи. Термоэлектроды термопар, начиная от горячих спаев, должны быть изолированы друг от друга. Концы термоэлектродов припаивают к медным соединительным проводам. Места спаев — холодные спаи термопар — погружают в сосуд Дьюара с тающим льдом. Медные провода дол-

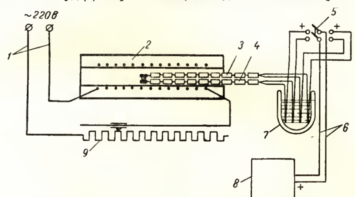


Рис. 3. 53. Схема установки для поверки термопары.

1 — провода от сети переменного тока; 2 — муфельная трубчатая печь; 3 — поверяемая термопара; 4 — образцовая термопара; 5 — переключатель; 6 — медные провода; 7 — сосуд Дьюара с тающим льдом; 8 — потенциометр; 9 — реостат.

жны быть изолированы друг от друга. Потенциометр должен быть класса точности 0,1 или 0,5 и иметь поверочное свидетельство. Измеряют э. д. с. термопар через каждые 100° С при целых значениях температуры, начиная от 300° С и выше до верхнего предела градуировки данного типа термопары. Рабочие термопары до 300° С поверяют по показаниям образцовых ртутных термометров.

Температуру горячих спаев термопар определяют по показаниям образцовой термопары и градуировочным таблицам с учетом поправок согласно поверочному свидетельству термопары.

Температуру печи необходимо повышать медленно, так, чтобы в момент отсчета она изменялась не больше чем на 1—2° С в течение 5 *мин.* Отверстия в печи должны быть закрыты асбестом. При каждой температуре надо измерять э. д. с. термопар не менее четырех раз.

Затем строят график зависимости э. д. с. от температуры образцовой термопары с учетом поправок по поверочному свидетельству. Пользуясь этим графиком, определяют температуру горячего спая поверяемой термопары; эта температура может несколько отклоняться от значений 300, 400° С и т. д. Полученные значения э. д. с. для двух термопар записывают в таблицу. Вычисляют средние арифметические значения э. д. с. для термопар при каждом замере. Погрешность поверяемой термопары определяют как разность э. д. с., полученных при поверке и взятых из градуировочных таблиц для данного типа термопары при тех же температурах. Для температур выше 300° С допустимые отклонения э. д. с. от э. д. с. градуировочных таблиц для термопар ХА и ХК не должны превышать $+1\%$.

Поверка показаний пирометрического милливольтметра

Схема поверки приведена на рис. 3. 54. Сопротивление $R_{вн}$ должно быть равно величине внешнего сопротивления, указанного на шкале милливольтметра, которое для щитовых приборов составляет 0,6; 5 и 15 *ом*. Температура окружающего воздуха при поверке должна быть $20 \pm 5°$ С.

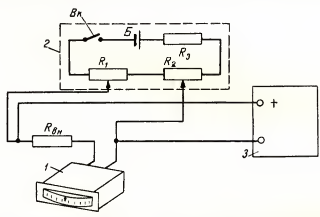


Рис. 3. 54. Схема установки для поверки пирометрического милливольтметра.

1 — милливольтметр; 2 — источник регулируемого напряжения; 3 — потенциометр; $R_{вн}$ — добавочное сопротивление; R_1 и R_2 — переменные сопротивления по 15 *ом*; R_3 — постоянное сопротивление 720 *ом*; Б — сухой элемент 1,5 *в*; Вк — выключатель.

Перед поверкой стрелку поверяемого милливольтметра устанавливают корректором на нуль. Медленно увеличивая напряжение от источника *2*, устанавливают стрелку милливольтметра на первое (считая от начала шкалы) оцифрованное деление и замеряют напряжение потенциометром. Аналогично этому устанавливают стрелку

последовательно на все оцифрованные деления шкалы при прямом ходе, а затем обратном и измеряют напряжение потенциометром. Полученные данные записывают в таблицу. Находят средние арифметические из двух измерений для каждого оцифрованного значения шкалы. По градуировочным таблицам для термопар того типа, на который градуирован милливольтметр, находят э. д. с. в милливольтах, соответствующих поверяемым точкам шкалы в °С, и записывают эти значения в таблицу. Погрешность милливольтметра определяют как разность между табличными значениями э. д. с. и напряжением, измеренным потенциометром для поверяемых точек данной шкалы. Величина погрешности не должна превышать допускаемой погрешности поверяемого милливольтметра.

Измерение сопротивления пирометрического милливольтметра

Схема измерения приведена на рис. 3. 55. Реостатом $R_б$ регулируют ток батареи так, чтобы стрелка милливольметра отклонилась примерно до середины шкалы. Измеряют потенциометром напряже-

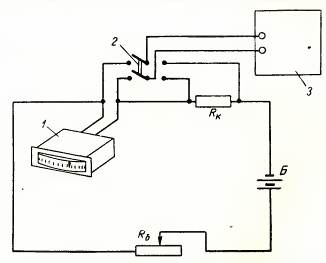


Рис. 3. 55. Схема установки для измерения сопротивления пирометрического милливольтметра.

1 — милливольтметр; *2* — переключатель; *3* — потенциометр; $R_к$ — сопротивление контрольное 100 *ом*; $R_б$ — реостат 500—1000 *ом*; *Б* — батарея из двух сухих элементов, соединенных последовательно.

ние $U_к$ на контрольном сопротивлении $R_к$ и затем, перекинув переключатель, измеряют напряжение $U_м$ на клеммах милливольтметра. Повторяют каждое измерение. Из полученных результатов находят

среднее арифметическое напряжение на $R_к$ и на милливольтметре. Сопротивление $R_м$ милливольтметра определяют по формуле

$$R_м = \frac{U_м}{U_к} R_к. \tag{3.43}$$

Таким же способом можно при помощи потенциометра и известного сопротивления измерить величину сопротивления термопары, термометра сопротивления, проводов, подключая их в схему вместо милливольтметра.

Поверка электронного потенциометра

Электронный потенциометр должен быть исправным. Проверяют ток батареи электронного потенциометра. Термопару отключают к клеммам, к которым была подключена термопара, подключают два медных провода от переносного потенциометра (рис. 3. 56). Плюс переносного потенциометра соединяют с плюсовой клеммой и минус с минусовой. Ртутный термометр располагают около клемм термопары внутри кожуха электронного потенциометра.

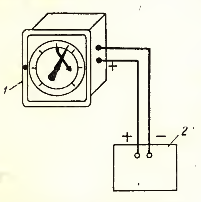


Рис. 3. 56. Схема поверки электронного потенциометра.
1 — электронный потенциометр; 2 — переносной потенциометр.

По градуировочной таблице для типа термопары, на который градуирован электронный потенциометр, находят число милливольт, соответствующее первой оцифрованной точке шкалы. По показаниям термометра находят поправку на температуру холодного спая и вычитают ее из числа милливольт, найденных по таблице для температуры поверяемой точки. Устанавливают декадный переключатель и реохорд переносного потенциометра на найденное число милливольт. Дают сбалансироваться электронному потенциометру и отсчитывают значения по показывающей шкале и диаграмме. Таким же способом поверяют показания на других оцифрованных точках шкалы.

Каждую точку поверить при прямом и обратном ходе указателя и пера. Составить таблицу показаний. Вычислить среднее арифметическое показаний для одинаковых напряжений, подаваемых от переносного потенциометра. Погрешность определяют как разность между температурой, соответствующей числу милливольт, задаваемых переносным потенциометром, и температурой, показанной электронным потенциометром.



Поверка электронного уравновешенного моста

Схема поверки приведена на рис. 3. 57. Катушки сопротивления по 2,5 *ом* включают в провода, соединяющие поверяемый мост с магазином, для создания требуемой величины внешнего сопротивления.

По градуировочной таблице для данного типа термометра сопротивления, на который градуирован поверяемый мост, находят значения сопротивлений термометра для оцифрованных точек шкалы. Устанавливают на магазине величину сопротивления, соответствующую первой оцифрованной точке шкалы поверяемого моста. Как только мост сбалансируется, отсчитывают показания. Таким же способом, устанавливая соответствующие значения сопротивлений на магазине, поверяют показания других оцифрованных точек. Повторяют измерения. Вычисляют среднее арифметическое значение для каждых двух измерений одной и той же точки шкалы. Составляют таблицу. Погрешность определяют как разность между температурой, показанной поверяемым электронным мостом, и температурой, найденной по градуировочной таблице для соответствующих точек.

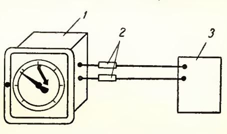


Рис. 3. 57. Схема поверки электронного уравновешенного моста.

1 — электронный мост; *2* — катушки сопротивления по 2,5 *ом*; *3* — магазин сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордов А. Г. и др. Методы измерения температур в промышленности. Металлургиздат, 1952.

2. Приборы для измерения температуры и их поверка. Инструктивные материалы. Сборник ВНИИМ им. Д. М. Менделеева. Машгиз, 1955.

3. Кульбуш Г. П. Электрические пирометры. Госэнергоиздат, 1932.

4. Жуковский В. С. Техническая термодинамика. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952.

5. The Stranducer Potentiometr, Instruments and Control Systems, v. 34, No. 1, January 1961.

6. Прусенко В. С. Элементы пневмоавтоматики для регулирования тепловых процессов. Госэнергоиздат, 1961.

7. Бутусов И. В. Автоматические контрольно-измерительные и регулирующие приборы, издание второе. Гостоптехиздат, 1961.

8. Денисов С. С. Электронные приборы контроля и автоматизации нефтехимических производств. Гостоптехиздат, 1960.

9. Кулаков М. В., Щепкин С. И. Автоматические контрольно-измерительные приборы для химических производств. Машгиз, 1961.

10. Ибрагимов И. А. Приборы автоматического контроля и регулирования химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Азнефтеиздат, 1959.

ГЛАВА 4

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗА И ПАРА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Приборы для измерения количества и расхода необходимы для контроля и регулирования материальных потоков технологических процессов и для расчетов между сторонами, поставляющими и потребляющими газ, водяной пар, нефть и нефтепродукты.

Количество вещества выражают в единицах объема или веса и измеряют счетчиками. Расход — количество вещества, протекающего в единицу времени через сечение трубопровода, измеряют расходомерами.

Большинство применяемых счетчиков и расходомеров измеряет количество вещества в объемных единицах (*л*, $м^3$). Имеются расходомеры с отсчетом в весовых единицах, они называются весовыми или массовыми расходомерами.

Для измерения количества и расхода в промышленных условиях применяют: счетчики количества (скоростные и объемные); расходомеры переменного и постоянного перепадов давления; расходомеры сыпучих тел. В последние годы стали применять массовые расходомеры, а также расходомеры, основанные на электрических методах измерения (индукционные) и др.

§ 1. СЧЕТЧИКИ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Скоростные счетчики — применяются для измерения количества жидкостей, не содержащих твердых примесей и некоррозийных, главным образом воды. Действие их основано на измерении числа оборотов вертушки, расположенной в трубопроводе. Имеются счетчики с горизонтальной (рис. 4. 1, *а*) и вертикальной (рис. 4. 1, *б*) вертушками. Вертушки из оргстекла или металла, укрепляемые на осях в подшипниках, могут свободно вращаться под действием потока жидкости. Число оборотов вертушки пропорцио-

нально скорости потока, а следовательно, и расходу в объемных единицах.

Счетчики характеризуются размером подсоединительных штуцеров (в *мм*) или калибром, характерным расходом, допустимыми наибольшим и наименьшим расходами, потерей напора, рабочими давлением и температурой и некоторыми другими показателями. Характерным расходом является количество жидкости в $м^3$, проходящее через счетчик при разности давлений входа и выхода, равной

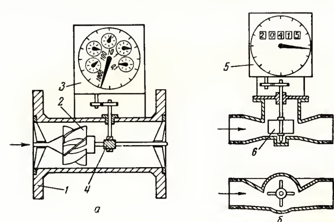


Рис. 4. 1. Схемы скоростных счетчиков.

а — с горизонтальной вертушкой; *б* — с вертикальной вертушкой; *1* — корпус; *2* — горизонтальная вертушка; *3* — счетный механизм со стрелочным циферблатом; *4* — червячный винт; *5* — счетный механизм с роликовым циферблатом; *6* — вертикальная вертушка.

1 $кГ/см^2$ в течение одного часа. Характерный расход позволяет оценивать и сравнивать различные счетчики. Эксплуатировать счетчик при характерном расходе не допускается. Действительная разность меньше 1 $кГ/см^2$, а допустимый расход через счетчик всегда меньше характерного.

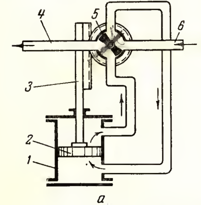
Скоростные счетчики с горизонтальной вертушкой изготовляют для измерения холодной и горячей воды калибром примерно от 50 до 300 *мм* и характерным расходом от 70 до 4000 $м^3/ч$. Счетчики с вертикальной вертушкой обычно применяют для измерения малых расходов воды и изготовляют калибром от 15 до 40 *мм* и характерным расходом от 3 до 20 $м^3/ч$. Рабочий диапазон расходов должен составлять 4—30% от характерного.

В промышленных условиях скоростные счетчики применяются для учета количества воды, потребляемой отдельными установками и цехами. Основная допустимая погрешность измерения скоростных счетчиков около $\pm 2\%$ от измеряемого значения.

Недостатком скоростных счетчиков является зависимость числа оборотов вертушки, а следовательно, и показаний от вязкости жидкости.

Объемные счетчики — имеют более широкое применение. Ими измеряют количество воды, нефти, нефтепродуктов и газа.

Действие объемных счетчиков основано на измерении числа определенных объемов жидкости (или газа), вытесняемой из измерительной камеры за какой-либо промежуток времени. Погрешность объемных счетчиков меньше, чем у скоростных, и составляет $0{,}2\% \div \div \pm 1\%$. На рис. 4. 2, *а* и *б* приведены схемы поршневых объемных счетчиков. Как видно из схем, поршни совершают возвратно-поступательные движения за счет автоматического переключения крана или золотника энергией потока. При каждом движении поршня отмеривается определенный объем жидкости. Счетный механизм (на рисунке не показан) измеряет число ходов поршня. Поршневые счетчики изготовляют с подсоединительными штуцерами диаметром от 25 до 200 *мм* на расходы примерно от 2 до 100 $м^3/ч$ и давление до 40 $кГ/см^2$.



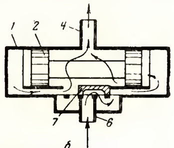


Рис. 4. 2. Схема объемных поршневых счетчиков.

а — с крановым переключением; *б* — с золотниковым переключением; *1* — корпус; *2* — поршень; *3* — шток с рейкой; *4* — линия выхода жидкости; *5* — кран переключения; *6* — линия входа жидкости; *7* — золотник.

На рис. 4. 3 показана схема распространенного дискового объемного счетчика для измерения воды и светлых нефтепродуктов. Счетчик состоит из камеры *1*, образованной из шарового пояса и двух конических поверхностей. Диск *2* прикреплен к шаровой опоре. В одной стороне диска имеется прорезь, которая облегает глухую перегородку *6*, разделяющую камеру. Под действием разности давлений между входом и выходом жидкости диск *2* колеблется (но не вращается) вдоль перегородки и одновременно обкатывает своими поверхностями нижний и верхний конусы камеры. Вследствие та-

кого колебания диска поводок 5 описывает конус, а его свободный конец вращает вал счетного механизма. При повороте поводка 5 на 360° через счетчик протекает объем жидкости, равный объему камеры. Погрешность дисковых счетчиков ±1% от измеряемого значения. Выпускаются дисковые счетчики калибром от 50 до 100 *мм* для характерного расхода от 30 до 100 *м*³/*ч*. Рабочий расход при длительной работе не должен превышать 20% характерного, а при кратковременных нагрузках не больше 50%. Наименьший допустимый расход 4% от характерного.

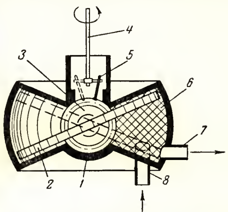


Рис. 4. 3. Схема дискового объемного счетчика.

1 — корпус камеры; 2 — диск; 3 — шаровая опора диска; 4 — вал счетного механизма; 5 — поводок диска; 6 — глухая перегородка; 7 — линия выхода жидкости; 8 — вход жидкости.

На рис. 4. 4 показана схема действия объемного счетчика с овальными шестернями. Шестерни размещаются внутри пустотелого закрытого корпуса на двух параллельных осях. Ось одной из шестерен вращает счетный механизм, расположенный снаружи крышки (на рисунке не показан). Поверхности шестерен пригнаны к поверхности корпуса, чтобы количество неучитываемой жидкости, протекающей через зазоры, было как можно меньше. Шестерни вращаются под действием разности давлений на входе и выходе счетчика.

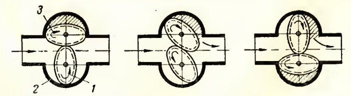


Рис. 4. 4. Схема объемного счетчика с овальными шестернями.

1 и 3 — овальные шестерни; 2 — корпус.

Жидкость, заключенная между шестерней и корпусом, вытесняется каждой шестерней за один оборот дважды. Такие счетчики применяются для измерения количества воды, легких нефтепродуктов и масел и выпускаются калибром от 12 до 250 *мм* на расход от 0,01 до 250 *м*³/*ч*. Погрешность их ±0,5% ÷ ±1% от измеряемого значения.

Аналогично описанному прибору работают ротационные газовые счетчики, в которых вместо шестерен на двух горизонтальных параллельных осях расположены два овальных гладких ротора,

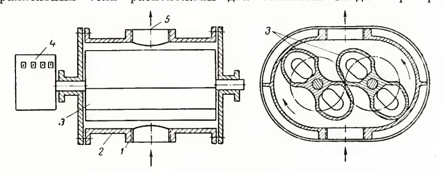


Рис. 4. 5. Схема ротационного газового счетчика.

1 — штуцер для входа газа; *2* — корпус; *3* — роторы; *4* — счетный механизм; *5* — штуцер для выхода газа.

соприкасающихся друг с другом и с внутренней поверхностью корпуса (рис. 4. 5).

Вал одного из роторов выведен наружу, он приводит в действие счетный механизм. Выпускаются ротационные газовые счетчики производительностью до 600 $м^3/ч$. Погрешность измерения $\pm 2\%$ от измеряемого значения.

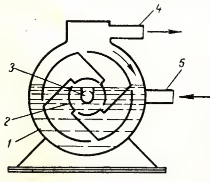


Рис. 4. 6. Схема объемного газового счетчика барабанного типа.

1 — кожух; *2* — барабан; *3* — ось полая; *4* — линия выхода газа; *5* — линия входа газа.

Для измерения небольших количеств газа — 5—50 *л/мин* применяют объемные счетчики барабанного типа. Счетчик состоит из цилиндрического кожуха *1* с горизонтально расположенной осью (рис. 4. 6) и барабана *2* с измерительными камерами. Барабан укреплен на полой оси *3*, через которую газ поступает в счетчик, и может свободно вращаться. Выступающая часть оси приводит в действие счетный механизм с указателем, расположенным на циферблате счетчика. Измерительные камеры через продольные прорези сообщаются с внутренней полостью барабана *2* и с полостью, ограниченной наружным кожухом. Счетчик заполняется водой до уровня немного выше центра оси *3*. Под действием разности давлений входа и выхода газ через полую ось *3* поступает в одну из измери-

тельных камер и начинает ее заполнять. По мере заполнения барабан начинает вращаться, и, когда внешняя прорезь камеры выходит из воды, газ начинает выходить из счетчика через выходной штуцер. Но одновременно заполняется следующая камера и т. д. Такой счетчик имеет погрешность $\pm 2\%$ от измеряемого значения. Уровень воды контролируется уровнемерным стеклом.

§ 2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗА И ПАРА ПО ПЕРЕМЕННОМУ ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЯ

Метод измерения расхода по перепаду давления получил очень широкое распространение. Для создания перепада давления в трубопровод устанавливают сужающее устройство — диафрагму, сопло или трубу Вентури. При прохождении через сужающее устройство в силу неразрывности струи возрастает скорость и при этом несколько уменьшается потенциальная и возрастает кинетическая энергия потока. Уменьшение потенциальной энергии характеризуется уменьшением статического давления потока. Величина перепада, или разности давлений, до и после сужающего устройств изменяется при изменении расхода. Зависимость между величиной перепада и расходом вполне определенна, поэтому, измерив перепад, можно определить расход.

Сужающие устройства

На рис. 4. 7 показаны схемы трех видов сужающих устройств: нормальной диафрагмы, сопла и трубы Вентури, применяемых в СССР. У диафрагмы и сопла перепад измеряется непосредственно около их поверхностей, для чего предусмотрены кольцевые камеры *2* и штуцера *4*. В трубе Вентури перепад измеряется перед соплом и в месте наибольшего сужения сопла.

Наибольшее распространение получила нормальная диафрагма. Сопло и труба Вентури применяются сравнительно редко.

Диафрагма представляет собой тонкий диск с концентрическим отверстием, имеющим острую входную кромку. Изготовляют диафрагму обычно из нержавеющей стали. Диаметр отверстия диафрагмы рассчитывают для каждого расходомера.

На рис. 4. 8 приведены схема действия расходомера и график изменения давления потока при протекании через диафрагму *2*. Как видно из схемы, расходомер состоит из сужающего устройства, установленного в трубопроводе *1*, и дифференциального манометра *3*. Последний измеряет перепад давления и имеет обычно шкалу, градуированную в единицах расхода. Место наибольшего сужения струи потока находится на некотором расстоянии за диафрагмой, в сечении *II*. В этом сечении давление потока минимальное.

Далее скорость потока уменьшается, а его давление повышается. Однако давление потока за диафрагмой всегда остается несколько

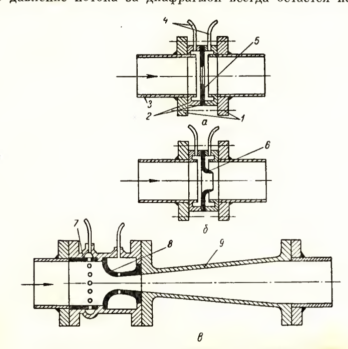


Рис. 4. 7. Сужающие устройства расходомеров.

а — диафрагма; *б* — сопло; *в* — труба Вентури; *1* — фланцы; *2* — кольцевые камеры; *3* — трубопровод; *4* — штуцера отбора давления; *5* — диафрагма; *6* — сопло; *7* — цилиндрическая вставка; *8* — вставка — сопло; *9* — диффузор.

меньшим давления до диафрагмы. Объясняется это потерей энергии на трение и завихрения. Величину δp называют остаточной потерей давления.

Уравнение расхода и расчетные формулы

При определении зависимости между расходом несжимаемой жидкости и перепадом давления исходят из уравнения Бернулли и условия неразрывности струи. Так, для диафрагмы, расположенной на горизонтальном участке трубопровода (рис. 4. 8), без учета потерь энергии уравнение Бернулли для сечений *I* и *II* потока, отнесенное к *1 кг* жидкости, имеет вид:

$$\frac{p_1'}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2'}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}, \qquad (4.1)$$

где p_1' и p_2' — абсолютные давления потока в сечениях I и II в $кГ/м^2$;

v_1 и v_2 — средние скорости потока в сечениях I и II в $м/сек$;

γ — удельный вес жидкости в рабочем состоянии перед диафрагмой в $кГ/м^3$;

g — ускорение силы тяжести в $м/сек^2$.

Из (4.1) находим

$$p_1' - p_2' = \frac{\gamma}{2g}(v_2^2 - v_1^2). \quad (4.2)$$

Из условия неразрывности потока имеем

$$F_1 v_1 = F_0 v_0 = F_2 v_2, \quad (4.3)$$

где F_1 — площадь трубопровода в сечении I в $м^2$;

F_0 — площадь отверстия диафрагмы в $м^2$;

F_2 — площадь потока в сечении II в $м^2$;

v_0 — скорость в отверстии диафрагмы.

На основании (4.3) вводим следующие обозначения: коэффициент диафрагмы

$$m = \frac{F_0}{F_1} = \frac{v_1}{v_0}, \quad (4.4)$$

коэффициент сужения струи

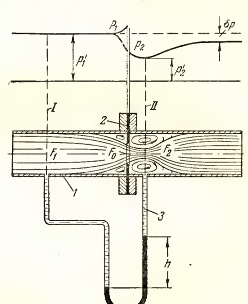


Рис. 4.8. Схема действия расходомера с диафрагмой.

$$\mu = \frac{F_2}{F_0} = \frac{v_0}{v_2}. \quad (4.5)$$

Тогда

$$v_1 = m v_0 \text{ и } v_0 = \mu v_2,$$

откуда

$$v_1 = \mu m v_2. \quad (4.6)$$

Значение v_1 из (4.6) подставляем в (4.2)

$$p_1' - p_2' = \frac{\gamma}{2g}(v_2^2 - \mu^2 m^2 v_2^2) \quad (4.7)$$

и находим v_2:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1' - p_2')} \; м/сек. \quad (4.8)$$

Объемный расход Q несжимаемой жидкости через сечение F_2 равен:

$$Q = F_2 v_2. \qquad (4.9)$$

Заменив F_2 согласно (4.5) на μF_0 и подставив значение v_2 из (4.8), получим

$$Q = \frac{\mu}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1' - p_2')} \text{ м}^3/\text{сек}. \qquad (4.10)$$

При использовании нормальной диафрагмы перепад измеряется вблизи диафрагмы и он несколько отличается от перепадов в сечениях I и II. Кроме того, в действительных условиях вследствие влияния трения о стенки и вязкостного сопротивления жидкости скорость распределяется неравномерно по поперечному сечению потока. Поэтому в формулу (4. 10) вводят еще один поправочный коэффициент ζ и она принимает вид:

$$Q = \frac{\zeta\mu}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1 - p_2)}, \qquad (4.11)$$

где p_1 и p_2 — давления, измеренные непосредственно у диафрагмы.

Величину

$$\frac{\zeta\mu}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}}$$

объединяют в один коэффициент α, который называют коэффициентом расхода, и тогда, заменив $p_1 - p_2$ на Δp, получим

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}\Delta p} \text{ м}^3/\text{сек} \qquad (4.12)$$

и в весовых единицах

$$G = Q\gamma = \alpha F_0 \sqrt{2g\gamma\Delta p} \text{ кг/сек}, \qquad (4.13)$$

где G — весовой расход несжимаемой жидкости.

Величина α зависит в основном от типа сужающего устройства, числа Рейнольдса и величины m — отношения площадей или квадратов диаметров отверстия сужающего устройства и трубопровода. От рода протекающего вещества величина α не зависит.

Физический смысл коэффициента расхода α состоит в том, что он показывает, во сколько раз действительный расход вещества, протекающего через диафрагму или другое сужающее устройство, меньше (или больше) теоретического расхода. Определяют α опытным путем для определенного типа сужающего устройства.

При протекании через сужающее устройство газа или пара необходимо учитывать отличие их скорости в наиболее узком сечении от скорости несжимаемой жидкости вследствие изменения удельного объема.

Удельный объем газа или пара в зоне сужения с пониженным давлением больше удельного объема перед сужающим устройством, и, следовательно, скорость их в зоне сужения будет больше скорости, подсчитанной для несжимаемой жидкости по уравнению (4. 8). Для учета этого отличия в формулу расхода для газов и пара вносят поправочный коэффициент ε на адиабатическое расширение измеряемой среды. Величину этого коэффициента определяют из уравнения

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1-\mu^2 m^2}{1-\mu^2 m^2\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}} \frac{1}{1-\frac{p_2}{p_1}} \frac{k}{k-1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (4.14)$$

где, кроме приведенных выше обозначений, k — показатель адиабаты.

С введением коэффициента ε формулы расхода для газов и пара будут

$$Q = \alpha\varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}\Delta p} \text{ м}^3/\text{сек} \quad (4.15)$$

и

$$G = \alpha\varepsilon F_0 \sqrt{2g\gamma\,\Delta p} \text{ кГ/сек}, \quad (4.16)$$

где γ — удельный вес газа или пара перед сужающим устройством

Сравнивая эти уравнения с уравнениями (4. 12) и (4. 13) для несжимаемых жидкостей, видим, что для последних $\varepsilon = 1$.

Все приведенные выше формулы расхода справедливы лишь при условии так называемого докритического истечения, когда скорость потока в сужающем устройстве зависит от разности давлений $p_1 - p_2$.

При отношении $(p_2/p_1)_{кр}$, называемом критическим, скорость струи в суженном сечении достигает скорости звука в данной среде. При дальнейшем уменьшении отношения $(p_2/p_1)_{кр}$ скорость получает сверхкритические значения. При этом скорость, а следовательно, и расход среды, протекающей через сужающее устройство, зависят только от давления p_1 и не зависят от разности $p_1 - p_2$.

Критическая скорость возникает при определенном отношении давлений и выражается уравнением

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (4.17)$$

Для водяного пара и трехатомных газов, в том числе и природного газа, показатель адиабаты k равен 1,3; тогда

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр} = 0{,}546. \quad (4.18)$$

Если отношение p_2/p_1 равно или меньше 0,546, то скорость в сужающем устройстве становится критической. При $p_2/p_1 > 0{,}546$ критическая скорость еще не наступает. Для природного газа критическая скорость равна около 400 *м/сек.*

Для практического пользования в уравнениях (4. 15) и (4. 16) величину F_0 выражают через диаметр d отверстия диафрагмы и разность давлений Δp заменяют высотой h столба жидкости в дифференциальном манометре, измеряющего перепад.

Как видно из рис. 4. 8, над уравновешивающей жидкостью в дифференциальном манометре находится жидкость, протекающая по трубопроводу; для таких условий перепад равен

$$\Delta p = 0{,}001\, h_{20}(\gamma'_{20} - \gamma''_{20})\ кГ/м^2, \qquad (4.19)$$

где h_{20} — разность высот уравновешивающей жидкости в дифференциальном манометре при 20° С в *мм*;

γ'_{20} — удельный вес уравновешивающей жидкости при 20° С в $кГ/м^3$;

γ''_{20} — удельный вес жидкости, находящейся в трубках дифференциального манометра над уравновешивающей жидкостью, при 20° С в $кГ/м^3$.

При измерении расхода газов, когда $\gamma''_{20} \leqslant 0{,}002\ \gamma'_{20}$, величиной γ''_{20} пренебрегают.

Если указанные величины заменить и перейти к часовому расходу, общая формула расхода в объемных единицах после объединения числовых величин имеет вид:

$$Q = 0{,}01252\, \alpha\varepsilon d^2 \sqrt{\frac{0{,}001\, h_{20}(\gamma'_{20} - \gamma''_{20})}{\gamma}}\ м^3/ч. \qquad (4.20)$$

Здесь d и h_{20} выражены в *мм* и $0{,}01252 = \frac{\pi}{4}\,\frac{3600}{10^6}\sqrt{2g}$.

При измерении расхода сухого газа или воздуха низкого давления в качестве уравновешивающей жидкости в дифференциальном манометре применяют воду удельного веса $\gamma'_{20} = 1000\ кГ/м^3$. Над водой находится газ. Величиной γ''_{20} пренебрегают. Формула расхода для этого случая имеет вид:

$$Q = 0{,}01252\, \alpha\varepsilon d^2 \sqrt{\frac{h_{20}}{\gamma}}\ м^3/ч. \qquad (4.21)$$

При измерениях расхода сухого газа или воздуха среднего и высокого давлений уравновешивающей жидкостью в дифференциальном манометре является ртуть удельного веса $\gamma'_{20} = 13\,546\ кГ/м^3$. Над

ртутью находится газ. Величиной γ''_{20} также пренебрегают. Формула расхода в этом случае будет

$$Q = 0{,}04610\,\alpha\varepsilon\, d^2 \sqrt{\frac{h_{20}}{\gamma}}\ \ м^3/ч. \qquad (4.22)$$

При измерениях расхода водяного пара и воды применяют обычно дифференциальные манометры с ртутным заполнением. Над ртутью находится вода. Формула расхода имеет вид:

$$Q = 0{,}04435\,\alpha\varepsilon\, d^2 \sqrt{\frac{h_{20}}{\gamma}}\ \ м^3/ч. \qquad (4.23)$$

Учет промышленных и природных газов ведут в объемных единицах расхода, приведенных к стандартным условиям ($t = 20°$ C, $p = 760$ *мм рт. ст.*) *. Для пересчета объемного расхода Q сухого газа при рабочих условиях в объемный расход $Q_{ст}$ при стандартных условиях пользуются формулой

$$Q_{ст} = Q\,\frac{\gamma}{\gamma_{ст}}\ \ м^3/ч, \qquad (4.24)$$

где, кроме указанных ранее обозначений, $\gamma_{ст}$ — удельный вес сухого газа при стандартных условиях.

Между удельными весами газа при рабочих и стандартных условиях существует зависимость

$$\gamma = \gamma_{ст}\,\frac{pT_{ст}}{p_{ст}TK}\ \ кГ/м^3, \qquad (4.25)$$

где p — абсолютное давление газа в $кГ/см^2$;
T — абсолютная температура газа в °K;
$p_{ст}$ — абсолютное давление газа при стандартных условиях;
$T_{ст}$ — абсолютная температура газа при стандартных условиях в °K;
K — коэффициент сжимаемости газа.

Коэффициент сжимаемости K характеризует отклонение свойств данного газа от свойств идеального газа и равен отношению удельного веса газа при p и T, подсчитанного по законам для идеального газа, к действительному удельному весу газа в рабочих условиях при p и T. Значения K берут по таблицам или графикам (см. рис. 4. 9).

Если в формулу (4. 24) подставить значение Q из (4. 22) и γ заменить на $\gamma_{ст}$, то получим

$$Q_{ст} = 0{,}7760\,\alpha\varepsilon\, d^2 \sqrt{\frac{ph_{20}}{\gamma_{ст}\,TK}}\ \ м^3/ч. \qquad (4.26)$$

Здесь h_{20} в *мм рт. ст.* при 20° C; p в $кГ/см^2$ абсолютных.

* Объемный расход газа при указанных стандартных условиях ранее назывался объемным расходом при нормальных условиях и обозначался $нм^3/ч$. В настоящее время нормальными условиями называют такие, при которых температура газа равна 0° C, а его давление 760 *мм рт. ст.*

При измерениях расхода нефтепродуктов применяют разделительные сосуды, заполненные нейтральной жидкостью. В этом случае над ртутью в дифференциальном манометре находится не измеряемая, а другая жидкость. Применяют разделительную жидкость и при измерениях расхода газа. Расход в этих случаях необходимо подсчитывать по формуле (4. 20), где γ''_{20} — удельный вес разделительной жидкости.

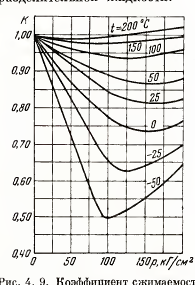


Рис. 4. 9. Коэффициент сжимаемости метана.

m	α
0,05	0,598
0,10	0,602
0,15	0,608
0,20	0,615
0,25	0,624
0,30	0,634
0,35	0,645
0,40	0,660
0,45	0,676
0,50	0,695
0,55	0,716
0,60	0,740
0,65	0,768
0,70	0,802

Рис. 4. 10. Исходный коэффициент расхода для нормальных диафрагм.

По приведенным выше формулам можно подсчитать расход жидкости газа или пара по измеренному перепаду.

Величину коэффициента расхода α для нормальных диафрагм находят по графику (рис. 4. 10). Как видно, α зависит от величины $m = d^2/D^2$ (где d — диаметр отверстия диафрагмы и D — диаметр трубопровода).

Коэффициент расхода определяют для данного вида диафрагмы опытным путем при соблюдении требований к качеству обработки диафрагмы и чистоте поверхности участка трубопровода, прилегающего к диафрагме. Необходимым условием является и следующее: число Рейнольдса Re должно быть больше определенного предельного значения для данного m.

Значения предельных чисел Рейнольдса приведены в табл. 4. 1.

Число Рейнольдса определяют по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{v_{\text{ср}} D}{\nu} = \frac{v_{\text{ср}} D \varrho}{\mu}, \qquad (4.27)$$

Таблица 4.1

Предельные значения $Re_{пр}$ для нормальных диафрагм

m	$Re_{пр}$	m	$Re_{пр}$
0,15	45 000	0,40	130 000
0,20	57 000	0,45	160 000
0,25	75 000	0,50	185 000
0,30	93 000	0,55	210 000
0,35	110 000	0,60	240 000

где $v_{ср}$ — средняя по сечению трубы скорость потока в *м/сек*;
D — диаметр трубопровода в *м*;
ϱ — плотность измеряемой среды в $кГ \cdot сек^2/м^4$;
μ — динамическая вязкость среды при рабочих условиях в $кГ \cdot сек/м^2$;
$\nu = \frac{\mu}{\varrho}$ — кинематическая вязкость при рабочих условиях в $м^2/сек$.

Если действительное число Рейнольдса меньше предельного, то в величину α вносят поправки на вязкость. Поправочный коэффициент k_1 на вязкость находят по графику (рис. 4. 11).

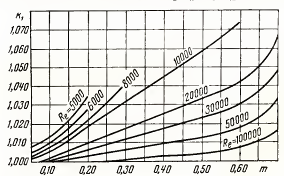


Рис. 4. 11. Поправочный множитель на вязкость для нормальных диафрагм.

В связи с тем, что в промышленных условиях трудно выдержать требования к чистоте обработки диафрагмы и внутренней поверхности трубопровода, в величину исходного коэффициента расхода вносят поправки на неостроту входной кромки k_2 (рис. 4. 12) и на шероховатость трубопровода k_3 (рис. 4. 13). В уравнении расхода принимается расчетная величина $\alpha_р$, равная

$$\alpha_р = \alpha k_1 k_2 k_3. \qquad (4.28)$$

Коэффициент ε, входящий в формулы расхода газов и пара, определяют по номограммам. В качестве примера на рис. 4. 14 приведена номограмма для определения ε в зависимости от отношения перепада Δp к давлению до диафрагмы p от m и K.

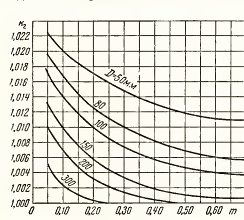


Рис. 4. 12. Поправочный множитель на неостроту входной кромки для нормальных диафрагм.

При подсчетах расхода необходимо также учитывать изменение диаметра отверстия диафрагмы от температуры. В особенности это относится к измерению расхода перегретого водяного пара, имеющего высокую (выше 200° С) температуру. Диаметр отверстия диафрагмы измеряют при комнатной (близкой к 20° С) температуре. Диаметр d диафрагмы при другой температуре t можно определить по формуле

$$d = d_{20}\,[1 + \alpha_t'\,(t - 20)],\quad (4.29)$$

где α_t' — средний коэффициент линейного теплового расширения материала диафрагмы.

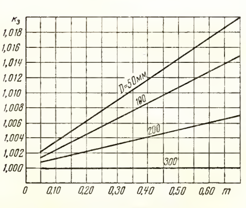


Рис. 4. 13. Поправочный множитель на шероховатость трубопровода для нормальных диафрагм.

Для точного определения величины m подсчитывают значение внутреннего диаметра трубопровода при рабочей температуре. При этом в формулу (4. 29) подставляют вместо d_{20} величину D_{20}.

Установка диафрагмы

Значительные погрешности в показания расходомера вносит неправильная установка диафрагмы в трубопроводе. В связи с этим при монтаже диафрагмы следят за тем, чтобы центр ее отверстия был расположен на оси трубопровода и на внутренней поверхности трубы перед и за диафрагмой не было уступов, неровностей, выступающих сварочных швов и прокладок.

При измерении расхода жидкостей диафрагму следует устанавливать на горизонтальном участке трубопровода. Лишь при измерении расхода газа и пара допускается установка диафрагмы на вертикальном трубопроводе. Однако практически стремятся избежать этого. Перед диафрагмой и после нее должны быть прямые участки трубопроводов определенной длины, считая от диска диафрагмы до ближайшего колена, тройника, вентиля, задвижки, регулирующего клапана и других видов местных сопротивлений и арматуры. Длина прямого участка до диафрагмы всегда больше, чем после диафрагмы. Она зависит от величины m и вида местного сопротивления или арматуры. Чем меньше m, тем длина прямых участков может быть меньше. Не полностью открытые задвижки, двойные повороты, регулирующие клапаны сильно искажают поток, поэтому прямые участки от них до диафрагмы достигают значений до $40\,D$. Длина прямого участка трубопровода после диафрагмы должна быть не менее $5D$. При определении длин прямых участков необходимо пользоваться указаниями, приведенными в специальной литературе. Руководящим материалом являются «Правила 27-54 по применению и поверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами и трубами Вентури» Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при ВСНХ.

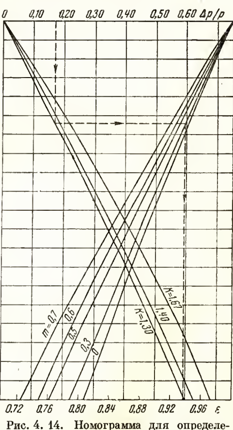


Рис. 4. 14. Номограмма для определения ε для нормальных диафрагм.

Дифференциальные манометры расходомеров

Для измерения перепада при низких давлениях могут применяться стеклянные U-образные манометры. При высоких давлениях используются описанные в главе 2 дифференциальные манометры, в которых стеклянные трубки закреплены в металлические колодки.

Стеклянные дифференциальные манометры пригодны лишь для разовых измерений, так как их показания отсчитывают визуально. В промышленных условиях большое распространение получили поплавковые дифференциальные манометры самопишущие или показывающие, которые по существу также являются U-образными манометрами.

Поплавковый дифференциальный манометр для работы при высоких (до 160 $кГ/м^2$) давлениях (рис. 4. 15) состоит из двух стальных цилиндрических сосудов, сообщающихся между собой трубкой. Сосуды до определенного уровня заполнены уравновешивающей жидкостью (ртутью или маслом). В сосуд *1* с поплавком *2*, подается давление до диафрагмы, а в сосуд *6*, который называется сменным и имеет меньший диаметр, подается давление после диафрагмы (—). Над сосудами между подводящими трубками имеется перемычка с вентилем *4*, который называется уравнительным; им пользуются при пуске прибора.

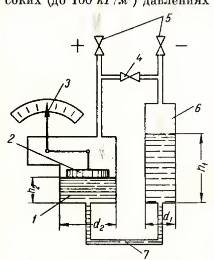


Рис. 4. 15. Схема поплавкового дифференциального манометра.

1 — сосуд с поплавком; *2* — поплавок; *3* — указатель; *4* — уравнительный вентиль; *5* — запорные вентили; *6* — сменный сосуд; *7* — соединительная трубка.

Перемещения поплавка передаются указателю *3*. Вентили *5* предназначены для включения и выключения дифференциального манометра.

Под действием перепада давления уровень ртути в сосуде с поплавком понижается, а в сменном сосуде повышается. Перепад давления уравновешивается разностью высот ртути в сосудах. Исходя из условия равенства объема ртути, перетекающей из сосуда *1* в сосуд *6*, согласно принятым на рис. 4. 15 обозначениям можно написать

$$d_2^2 h_2 = d_1^2 (h_1 - h_2), \tag{4.30}$$

откуда

$$h_1 = h_2 \left(1 + \frac{d_2^2}{d_1^2} \right). \tag{4.31}$$

Из последней формулы следует, что при заданных d_2 и h_2 для получения разной высоты h_1 необходимо изменять диаметр d_1. Чтобы высота h_1 ртути в сменном сосуде стала больше, диаметра d_1 надо уменьшить. Пределы измерения дифференциального манометра по

перепаду определяют максимальной высотой h_1 поднятия ртути в сменном сосуде.

Отечественные дифференциальные поплавковые манометры с ртутным заполнением выпускают на следующие пределы измерения по перепаду в *мм рт. ст.*, образующие стандартный ряд: 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 *мм*. Каждому пределу соответствует свой сменный сосуд. Чем больше предел измерения, тем меньше диаметр сменного сосуда и больше его высота. Диаметр сосуда с поплавком принят равным 78 *мм*, а ход поплавка 30,5 *мм*.

Сосуд с поплавком и все другие детали дифференциальных манометров на разные пределы измерения одинаковы.

В целях ограничения числа видов шкал и диаграмм самопишущих приборов для отечественных расходомеров принят следующий ряд верхних пределов измерения: (1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8) 10^n, где n — любое целое положительное или отрицательное число или нуль. Размерность шкалы выбирается в единицах расхода. Например, если максимальный измеряемый расход равен 1800 $м^3/ч$, то следует выбрать дифференциальный манометр со шкалой $2 \times \times 10^3 = 2000$ $м^3/ч$ и т. п.

Вследствие квадратичной зависимости между расходом и перепадом шкалы расходомеров неравномерны. Некоторые самопишущие приборы имеют устройство для суммирования расхода в виде интеграторов с цифровым отсчетом.

На рис. 4. 16 показана схема поплавкового дифференциального манометра с электрической индукционной передачей показаний на расстояние. Действие схемы такой передачи было описано в главе 2 (см. рис. 2. 17). Заполняют такие приборы ртутью. Они применяются для измерения тех же перепадов, которые указаны для поплавковых приборов, описанных выше.

На рис. 4. 17 показана схема поплавкового дифференциального манометра для измерения расхода при небольших перепадах и небольшом (до 3 $кГ/см^2$) давлении. Поплавок пустотелый. Сосуды заполняют вазелиновым маслом. Пределы измерения по перепаду до 400 *мм вод. ст.*

Для измерения расхода применяют также дифференциальные манометры типа «кольцевые весы» (см. гл. 2, рис. 2. 6).

Наибольшее распространение в промышленности получили дифференциальные манометры с ртутным заполнением. Они выпускаются и с устройством пневматической телепередачи показаний, такой же, как и у описанного в главе 2 манометра (см. рис. 2. 17). Однако эксплуатация этих приборов сопряжена с необходимостью соблюдения ряда предосторожностей, направленных к предупреждению от отравления ртутью обслуживающего персонала. В связи с этим стали выпускаться мембранные дифференциальные манометры без заполнения их ртутью.

На рис. 4. 18 показана схема устройства мембранного дифференциального манометра с пневматической системой передачи показаний на расстояние. Чувствительным элементом этого манометра являются мембраны *2*, которые образуют полости, заполняемые жидкостью (смесью глицерина с водой). Под действием измеряемого перепада мембраны перемещают главный рычаг *6*. На свободном конце рычага *6* закреплена заслонка *9* сопла *10*. С увеличением перепада заслонка

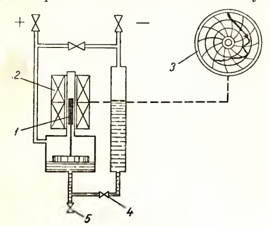


Рис. 4. 16. Схема поплавкового дифференциального манометра с электрической индукционной передачей показаний на расстояние.

1 — сердечник поплавка; *2* — индукционная катушка; *3* —вторичный прибор; *4* — вентиль для глушения пульсаций; *5* — вентиль для спуска ртути.

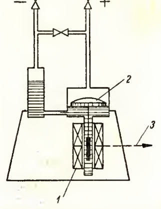


Рис. 4. 17. Схема поплавкового дифференциального манометра на низкое давление с электрической индукционной передачей показаний.

1 — индукционная катушка; *2* — поплавок; *3* — провода к вторичному прибору.

приближается, а с уменьшением отдаляется от сопла. Сопло и заслонка образуют одно из звеньев пневматического устройства. Входная величина этого устройства — перемещение заслонки относительно сопла — является функцией измеряемого перепада. Выходная величина — давление сжатого воздуха — изменяется пропорционально измеряемому перепаду в пределах 0,2—1,0 *кГ/см²*. Показания отсчитывают по шкале вторичного прибора *8*, который может быть установлен на расстоянии до 300 *м* от дифференциального манометра.

Усилитель *14* пневматического устройства питается сжатым воздухом давлением 1,4 *кГ/см²*, поступающим в камеру *В*. Основной поток воздуха стремится пройти через средний шариковый клапан в камеру *Б*, откуда он направляется к вторичному прибору *8* и в сильфон обратной связи *16*. Другая небольшая часть воздуха через нижний шариковый клапан из камеры *В* поступает в камеру *Г*

и далее через постоянный дроссель *12* к соплу *10*. Давление за дросселем по трубкам передается в камеры *А* и *Д* и изменяется в зависимости от положения заслонки *9* относительно сопла *10*. Когда от увеличения измеряемого расхода заслонка приближается к соплу, давление в камерах *А* и *Д* увеличивается, а когда удаляется, то уменьшается. Камера *А* отделена от камеры *Б* двумя сдвоенными мембранами, причем площадь верхней мембраны больше площади нижней. В связи с этим давление в камере *Б* всегда больше давления в камере *А*. Когда давление в камере *А* увеличивается, то верхние сдвоенные мембраны прогибаются вниз. Верхний шариковый клапан

Рис. 4. 18. Мембранный дифференциальный манометр с пневматической системой передачи показаний.

1 — линия давления до диафрагмы; *2* — мембранный чувствительный элемент; *3* — линия давления после диафрагмы; *4* — разделительная мембрана; *5* — опора главного рычага; *6* — главный рычаг; *7* — передвижная опора; *8* — вторичный прибор; *9* — заслонка; *10* — сопло; *11* — рычаг обратной связи; *12* — постоянный дроссель; *13* — линия питания сжатым воздухом; *14* — пневмоусилитель; *15* — пружина; *16* — сильфон обратной связи.

прикрывает отверстие, через которое воздух уходит в атмосферу, а средний открывает отверстие в перегородке, разделяющей камеры *В* и *Б*. В результате давление в камере *Б* и на выходе увеличивается. Мембрана, разделяющая камеры *Г* и *Д*, и нижний шариковый клапан служат для поддержания постоянного перепада давления на дросселе *12*. Как видно из схемы, давление в камере *Г* всегда больше давления в камере *Д* на величину, пропорциональную упругости пружины в камере *Д*. При уменьшении давления после дросселя, а следовательно, и в камере *Д* мембрана прогнется вниз и нижний шариковый клапан прикроет отверстие для доступа воз-

духа в камеру *Г*. При увеличении давления в камере *Д* шариковый клапан откроется и приток воздуха увеличится. Так достигается постоянство разности давлений в камерах *Г* и *Д*, а следовательно, и постоянство перепада на дросселе *12*. Такое устройство не позволяет изменяться выходному давлению от колебаний давления питающего воздуха.

При измерении перепада давления мембранным дифференциальным манометром происходит взаимная компенсация двух противоположных моментов сил, действующих на главный рычаг *6*. Такие приборы называются компенсационными. Особенность их в том, что подвижные детали перемещаются на очень малые расстояния. В рассматриваемом приборе главный рычаг и мембраны перемещаются лишь настолько, сколько требуется для перемещения заслонки относительно сопла от положения полного открытия до полного закрытия. Рабочий ход заслонки очень мал и составляет около 0,1 *мм*. Сильфон *16* называется сильфоном обратной связи. Он является звеном, в котором выходная величина пневматического устройства воздействует на входную.

Мембраны *2* изготовляют из коррозионно-устойчивых материалов, промежуток между каждой парой мембран весьма мал (на рисунке он показан в увеличенном виде). Такая конструкция позволяет мембранам выдерживать высокое одностороннее давление, что является одним из преимуществ этого прибора.

Мембранный дифференциальный манометр описанного типа выпускается на такой же ряд пределов измерения по перепаду и с такими же шкалами, с какими выпускаются поплавковые дифференциальные манометры с ртутным заполнением. Пределы измерения мембранного манометра можно изменить путем перемещения опоры *7* вдоль главного рычага. Пружина *15* служит для подгонки нулевой точки.

Дифференциальные манометры-расходомеры требуют правильной установки. Расстояние от них до диафрагмы может быть от 1—2 до 40—50 *м*. Однако лучше устанавливать дифференциальные манометры как можно ближе к их диафрагмам.

Иногда для централизации контроля дифференциальные манометры устанавливают на щитах с другими приборами в помещениях. При этом принимают меры к тому, чтобы газ или жидкий нефтепродукт в целях соблюдения противопожарных условий не мог попасть по трубкам в помещение. На трубках устанавливают разделительные сосуды, заполненные какой-либо другой не смешивающейся с нефтепродуктом жидкостью, называемой разделительной. Разделительные сосуды устанавливают также при измерениях агрессивных жидкостей, например растворов щелочей и кислот и тяжелых легко застывающих нефтепродуктов. Во всех случаях основным условием является поддержание одинакового уровня разделительной жидкости в сосудах. Сосуды должны иметь достаточно большой диаметр,

чтобы возможные изменения уровня разделительной жидкости в них при изменении перепада были минимальными.

При измерении расхода водяного пара обязательна установка конденсационных сосудов, которые должны быть смонтированы так, чтобы уровень конденсата в них был одинаковым.

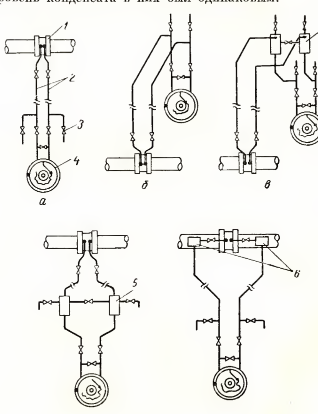


Рис. 4. 19. Схемы установки дифференциальных манометров.

а и *б* — для некоррозийных жидкостей и сухого газа; *в* — для газа и жидких нефтепродуктов (с разделительными сосудами); *г* — для коррозийных жидкостей; *д* — для водяного пара. *1* — диафрагма; *2* — соединительные трубки; *3* — продувочные вентили; *4* — дифференциальный манометр; *5* — разделительные сосуды; *6* — конденсационные сосуды.

На рис. 4. 19 приведены некоторые основные схемы установки дифференциальных манометров.

Постоянная времени дифференциальных манометров при измерении расхода жидкости очень мала и при небольшой длине соединительных трубок от диафрагмы составляет доли секунды. Вследствие того, что поплавки манометров и ртуть имеют значительную

массу, в дифференциальных манометрах часто возникают нежелательные колебательные процессы, которые устраняют дросселированием перетока ртути между сосудами при помощи небольшого игольчатого вентиля.

Методика расчета нормальной диафрагмы

Расчет состоит в определении диаметра отверстия диафрагмы для заданного расхода.

Общую формулу расхода для несжимаемых жидкостей (4.20), в которой $\varepsilon = 1$ и $0{,}001\, h_{20} (\gamma'_{20} - \gamma''_{20}) = \Delta p$, можно написать в следующем виде:

$$\alpha\, d^2 = \frac{Q \sqrt{\gamma}}{0{,}01252 \sqrt{\Delta p}}\,. \tag{4.32}$$

Разделив обе части на D^2, получим

$$\frac{\alpha\, d^2}{D^2} = \alpha\, m = \frac{Q \sqrt{\gamma}}{0{,}01252\, D^2 \sqrt{\Delta p}}\,, \tag{4.33}$$

$$\sqrt{\Delta p} = \frac{Q \sqrt{\gamma}}{\alpha\, m\, 0{,}01252\, D^2}\,, \tag{4.34}$$

где D — внутренний диаметр трубопровода в *мм*.

Обозначив $\frac{Q \sqrt{\alpha}}{0{,}01252\, D^2} = C$, находим

$$\Delta p = \left(\frac{C}{\alpha\, m}\right)^2. \tag{4.35}$$

При расчете диафрагмы величины Q, γ и D известны. Неизвестны α, m и Δp.

Исходя из того, что для нормальной диафрагмы известна зависимость α от m, строят график m как функции от $\alpha\, m$ (рис. 4. 20). Это дает возможность, задавшись Δp, определить по формуле (4. 33) $\alpha\, m$ и m. Далее по величине m при известном D легко найти d.

Величина перепада Δp, принимаемого в расчет, зависит и от статического давления потока. При низких давлениях перепад не может быть большим. Например, когда измеряют расход сжатого воздуха при давлениях до 0,02 *кГ/см²*, перепад, создаваемый диафрагмой, не должен быть больше 40—60 *мм вод. ст.* Важно также, чтобы диафрагма не создавала значительных вредных потерь давления потока, что невыгодно экономически. При измерениях расхода пара, газа и жидкостей в промышленных условиях, когда давление обычно превышает 1 *кГ/см²*, величину перепада принимают от 40 до 1000 *мм рт. ст.*

В целях уменьшения вредных влияний на точность измерения расхода (непредвиденных завихрений потока, вязкости и других

факторов) выгоднее увеличивать перепад. Это достигается уменьшением диаметра отверстия диафрагмы, а следовательно, уменьшением величины m. Но вместе с этим увеличиваются вредные потери давления, величина которых составляет приблизительно 0,5 Δp. Сделав выбор Δp, следует проверить величину вредных потерь. В условиях измерения расхода промышленных потоков при перепадах до 1000 *мм рт. ст.* вредные потери относительно невелики и ими часто пренебрегают.

Для определения Δp сначала задаются величиной m (обычно 0,2), а затем по графику (рис. 4. 20) находят α и решают уравнение (4. 35). При этом Q берут равным ближайшему к заданному расходу значению стандартного ряда шкал дифференциальных манометров. По формуле (4. 19) находят перепад h_{20} *мм рт. ст.*, соответствующий найденному Δp, и округляют его до ближайшего значения из стандартного ряда перепадов.

Диаметр отверстия диафрагмы определяют по формуле

$$d_{20} = D_{20} \sqrt{m}. \qquad (4.36)$$

Рис. 4. 20. График зависимости m от $m\alpha$ для нормальных диафрагм.

Если температура потока сильно отличается от 20° С, то вместо D_{20} надо принять его значение при рабочей температуре по формуле (4. 29).

После этого проверяют правильность расчета. По найденному d_{20} определяют расход по соответствующей формуле расхода. Если результат совпадает с точностью $\pm 0{,}2\%$ с принятым расчетным значением Q, то, следовательно, расчет сделан правильно и по найденному d_{20} изготовляют диафрагму. При проверке уточняют значение α путем внесения поправок k_1, k_2 и k_3, а также учитывают расширение диафрагмы от температуры. Для газа и пара вводят коэффициент ε. Подробный ход расчета диафрагмы приведен в упомянутых «Правилах 27-54», которыми и следует руководствоваться.

Пределы измерения каждого расходомера рассчитывают на определенное вещество (газ, пар или жидкость), определенные давление, температуру, плотность и вязкость. По кривой расхода, записанной на диаграмме прибора, можно вычислить количество измеряемого вещества за любой промежуток времени. Для этого надо найти средний расход и умножить его на число часов измерения. В практике подсчитывают суточное количество. Однако так можно подсчитывать, если условия потока равны расчетным значениям.

В действительности же расчетные условия для потока даже одного и того же вещества могут изменяться. В связи с этим при измерениях расхода одновременно измеряют и регистрируют давление, температуру потока, а иногда и плотность измеряемого вещества. Находят среднесуточные значения давления, температуры и плотности. Если они существенно отличаются от расчетных значений, то в показания расходомеров вносят поправки.

Действительный расход вычисляют по следующим формулам, в которых рабочие значения параметров обозначены так же, как и расчетные, но с добавлением индекса:

при изменении удельного веса среды (жидкости, газа или пара в рабочем состоянии)

$$Q' = Q\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}}; \qquad (4.37)$$

то же сухого газа в стандартных условиях

$$Q'_{\text{ст}} = Q_{\text{ст}}\sqrt{\frac{\gamma_{\text{ст}}}{\gamma'_{\text{ст}}}}; \qquad (4.38)$$

при изменении температуры сухого газа в стандартных условиях

$$Q'_{\text{ст}} = Q_{\text{ст}}\sqrt{\frac{TK}{T'K'}}; \qquad (4.39)$$

при изменении давления сухого газа в стандартных условиях

$$Q'_{\text{ст}} = Q_{\text{ст}}\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\sqrt{\frac{p'K}{pK'}}. \qquad (4.40)$$

Диаграммы расходомеров. Планиметры для обработки диаграмм

Бо́льшая часть самопишущих поплавковых дифференциальных манометров для измерения расхода газа и пара имеет устройство для дополнительной записи давления измеряемого потока, и на их дисковой диаграмме одновременно записываются кривая расхода и кривая давления. Температуру потока регистрируют редко, лишь когда она часто и заметно изменяется. Измеряют температуру обычно ртутным термометром несколько раз в течение суток и при подсчете количества потока принимают среднее значение.

Для подсчета суточного количества по диаграмме расходомера необходимо определить средние значения часового расхода.

Имеются дифференциальные манометры, механизм которых содержит суммирующее устройство, называемое интегратором. Интегратор имеет цифровой счетчик и отметчик, которые на диаграмме фиксируют число единиц измерения потока, прошедшего через диафрагму данного расходомера за промежуток времени. Однако

в практике подсчет среднего часового расхода обычно определяют по кривым записи показаний на диаграмме расходомера. Шкалы и диаграммы самопишущих манометров равномерны. Шкалы и диаграммы расходомеров, выраженные в единице расхода, как указывалось, неравномерны. В практике большое распространение получили так называемые стопроцентные диаграммы равномерные и неравномерные.

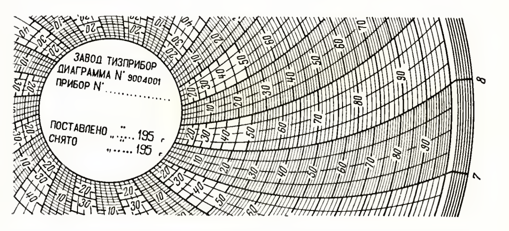


Рис. 4. 21. Стопроцентная комбинированная диаграмма расходомера с дополнительной записью давления.

Оба эти вида диаграмм разбиты на 100 делений. Для взятия отсчета необходимо знать верхний предел шкалы для манометра в $кГ/см^2$ и для расходомера в $м^3/ч$ или других единицах. По кривой записи определяют средние значения радиуса кривых давления и расхода в процентах и затем переводят их путем вычисления в $кГ/см^2$ и в единицы расхода. Для расходомеров с дополнительной записью давления печатают диаграммы комбинированные с чередующимися равномерными и неравномерными секторами (рис. 4. 21). Как видно, оцифрованные деления неравномерной шкалы соответствуют корню квадратному из делений равномерной шкалы (с коэффициентом 10).

Поскольку расход и давление в течение суток могут изменяться, то определить средний радиус их кривых по диаграмме визуально затруднительно; для этой цели применяют специальные вспомогательные приборы, называемые планиметрами.

Для определения среднего радиуса кривой записи давления применяют пропорциональные планиметры (рис. 4. 22). Диаграмму *1* кладут на ровную доску, в ее центр устанавливают направляющую кнопку *8* и накладывают планиметр, как показано на рисунке. За-

мечают начальное положение обводного штифта *2* по кривой давления *9* и устанавливают барабан *3* и счетное колесо *5* на нуль. После этого обводят кривую штифтом *2*, перемещая планиметр против часовой стрелки вручную так, чтобы барабан *3* все время прикасался

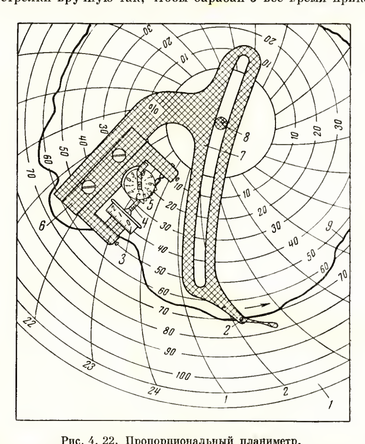


Рис. 4. 22. Пропорциональный планиметр.

1 — диаграмма; *2* — обводной штифт; *3* — барабан; *4* — червячный винт; *5* — счетное колесо; *6* — плата счетного механизма; *7* — плата с направляющей прорезью; *8* — кнопка; *9* — кривая давления на диаграмме.

к диаграмме. По возвращении к исходной точке отсчитывают три цифры по счетному колесу и шкале барабана, причем запятую ставят после первых двух значащих цифр. Полученные значения пропорционального планиметра являются непосредственно величиной среднесуточного радиуса кривой давления в процентах от верхнего предела шкалы манометра (принимаемого за 100%).

Для определения среднего радиуса кривой расхода по диаграмме с неравномерными делениями применяют корневой планиметр (рис. 4. 23), отличающийся от пропорционального лишь формой прорези в плате. Отсчитанные значения после умножения на коэф-

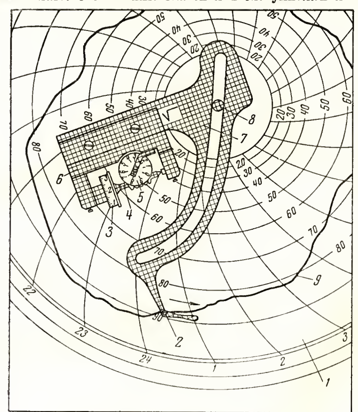


Рис. 4. 23. Корневой планиметр.

1 — диаграмма; 2 — обводной штифт; 3 — барабан; 4 — червячный винт; 5 — счетное колесо; 6 — плата счетного механизма; 7 — плата с направляющей прорезью; 8 — кнопка; 9 — кривая расхода на диаграмме.

фициент планиметра дают среднесуточную величину радиуса кривой расхода в процентах от верхнего предела шкалы.

Существуют диаграммы манометров и расходомеров с делениями в $кГ/см^2$ и единицах расхода. Указанными планиметрами несложно определить средние радиусы кривых и на таких диаграммах. Пользуясь соответствующими инструкциями, можно также определять средние радиусы за любой промежуток времени, когда прибор работал неполные сутки (см. § 7).

§ 3. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Типичным представителем этого вида приборов является р о т а м е т р (рис. 4. 24). В трубопровод устанавливают в строго вертикальном положении закрепленную в соответствующую арматуру стеклянную конусную трубку *1*. В трубке расположен поплавок *2*, наибольший диаметр которого равен или немного больше диаметра трубки в нижней части. При протекании жидкости или газа снизу вверх поплавок увлекается потоком, и по степени его поднятия можно судить о расходе. При установившемся потоке поплавок поддерживается на определенной высоте, которая может изменяться лишь при изменении расхода. Шкалу ротаметра наносят на наружную поверхность стеклянной трубки.

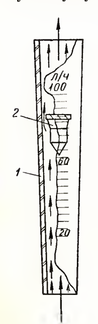


Рис. 4. 24. Схема ротаметра.

1 — конусная стеклянная трубка; *2* — поплавок.

Как видно из схемы, в ротаметре измеряемая жидкость или газ проходят через сечение в виде кольцевого зазора между трубкой и поплавком. В отличие от расходомеров с диафрагмой в ротаметрах при изменениях расхода изменяется не перепад давления, а площадь кольцевого зазора вследствие перемещений поплавка вдоль конусной трубки. Перепад же остается постоянным при любом установившемся расходе в пределах пропускной способности ротаметра. Только при неустановившемся соотоянии перепад увеличивается или уменьшается и заставляет поплавок подняться или опуститься. Вызванное перемещение поплавка приводит к изменению площади кольцевого зазора, и перепад снова приобретает прежнее значение.

На поплавок действует:

сила f_1, направленная вниз и равная весу поплавка в жидкости,

$$f_1 = v_п (\gamma_п - \gamma), \tag{4.41}$$

где $v_п$ — объем поплавка;

$\gamma_п$ — удельный вес материала поплавка;

γ — удельный вес жидкости,

сила f_2, направленная вверх (без учета трения поплавка о жидкость и гидродинамического давления потока),

$$f_2 = F_п (p_1 - p_2), \tag{4.42}$$

где $F_п$ — площадь сечения поплавка в самом широком месте;

p_1 — давление под поплавком;

p_2 — давление над поплавком.

При установившемся потоке, когда поплавок удерживается на определенной высоте, силы f_1 и f_2 равны, следовательно,

$$v_п(\gamma_п - \gamma) = F_п(p_1 - p_2). \quad (4.43)$$

Выражая перепад через высоту h столба жидкости, т. е. $p_1 - p_2 = h\gamma$, из (4.43) получим

$$h = \frac{v_п(\gamma_п - \gamma)}{F_п \gamma}. \quad (4.44)$$

Все величины, входящие в правую часть этой формулы, для данных ротаметра и измеряемой среды постоянны и, следовательно, величина h постоянная и не зависит от расхода.

Формула расхода для ротаметра может быть выведена так. Согласно законам гидродинамики скорость w жидкости выражается уравнением

$$w = \sqrt{2gh} = \sqrt{\frac{2gv_п(\gamma_п - \gamma)}{F_п \gamma}}, \quad (4.45)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Расход Q в объемных единицах равен произведению скорости на площадь сечения кольцевого зазора $F_к$ между трубкой и поплавком:

$$Q = F_к \alpha \sqrt{\frac{2gv_п(\gamma_п - \gamma)}{F_п \gamma}} \ м^3/сек, \quad (4.46)$$

где α — коэффициент расхода.

Расход G в весовых единицах равен:

$$G = F_к \alpha \sqrt{\frac{2gv_п(\gamma_п - \gamma)\gamma}{F_п}} \ кГ/сек. \quad (4.47)$$

Величины под корнем можно считать постоянными для определенного ротаметра и при неизменном удельном весе жидкости. Заменим постоянные величины коэффициентом K. Тогда в общем виде уравнение расхода ротаметра будет

$$Q = K \alpha F_к. \quad (4.48)$$

Итак, расход зависит от площади кольцевого зазора и не зависит от величины перепада давления. Зависимость эта линейная, и, следовательно, шкала ротаметра имеет равномерные деления (при равномерной конусности трубки).

Ротаметры применяют главным образом для измерения малых расходов жидкостей и газов. Ими можно измерить расход 0,5 *л/ч* и даже меньше. Верхний предел измерения ротаметров ограничивается лишь по конструктивным соображениям. Ротаметры со стеклянной трубкой выпускают на условный диаметр до 40 *мм*, на максимальный расход по воде до 3000 *л/ч* и по воздуху до 40 $м^3/ч$ при p до 6 $кГ/см^2$. Основная погрешность их $\pm 2{,}5\%$.

Ротаметры очень чувствительные приборы. При работе на жидкости их постоянная времени очень мала и составляет доли секунды.

Поплавок может быть изготовлен из коррозионно-устойчивого материала, поэтому ротаметры часто применяют для измерения расходов растворов кислот и щелочей.

Свое название ротаметры получили вследствие вращения поплавка (от английского слова rotator — вращающийся). На верхнем ободке поплавка нанесены косые пазы, благодаря которым поток вращает его, придавая большую устойчивость. Однако существуют разновидности ротаметров и с невращающимся поплавком.

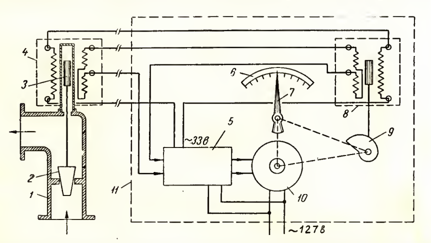


Рис. 4. 25. Схема ротаметра с электрической дистанционной передачей показаний.

1 — корпус ротаметра; *2* — поплавок; *3* — сердечник; *4* — катушки датчика; *5* — электронный усилитель; *6* — шкала; *7* — указатель; *8* — катушка вторичного прибора; *9* — профилированный диск; *10* — реверсивный двигатель; *11* — вторичный прибор.

Ротаметры применяют и для измерения вязких жидкостей. Чтобы уменьшить влияние вязкости поплавок изготовляют в виде тонкого диска, имеющего небольшую поверхность.

Недостатками ротаметров со стеклянными трубками являются хрупкость трубки, невозможность измерения расхода темных и непрозрачных жидкостей, визуальный отсчет и некоторые другие.

Выпускают ротаметры с металлическими трубками с дистанционной системой передачи показаний электрического и пневматического действия. На рис. 4. 25 приведена упрощенная схема металлического ротаметра с электропередачей. У этого ротаметра нет длинной конусной трубки, ее заменяют кольцо с конусной выточкой и поплавок конусной формы. При поднятии поплавка площадь сечения кольцевого зазора увеличивается, а при опускании уменьшается. Поплавок стержнем связан с железным сердечником *3*, находящимся

в защитной направляющей трубке из немагнитного металла. Снаружи на трубу надета индукционная катушка *4*. Такие же катушки *8* и сердечник имеются во вторичном приборе. Длина рабочего хода поплавка около 7 *мм*. Каждая из катушек имеет две обмотки — первичную и вторичную. Последняя состоит из двух секций, включенных встречно. Первичные обмотки питаются переменным током напряжением 33 *в*. Во вторичных обмотках индуктируется э. д. с.

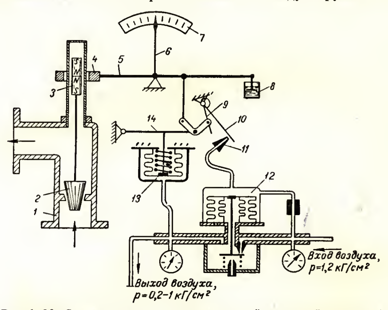


Рис. 4. 26. Схема ротаметра с пневматической передачей показаний.

1 — корпус ротаметра; *2* — поплавок; *3* — магнитный сердечник; *4* — наружный магнит; *5* — главный рычаг; *6* — указатель; *7* — шкала; *8* — успокоитель; *9* — поводок заслонки; *10* — заслонка; *11* — сопло; *12* — пневмоусилитель; *13* — устройство обратной связи; *14* — рычаг обратной связи.

Схема включения катушек, показанная на рисунке, называется дифференциально-трансформаторной.

В цепь тока вторичных обмоток включен электронный усилитель *5*. Когда сердечники занимают одинаковое положение относительно секций вторичных обмоток катушек, то их э. д. с. взаимно компенсируются и напряжение на входе электронного усилителя равно нулю. При изменении расхода поплавок ротаметра изменяет свое положение. Это приводит к разбалансу схемы, и на вход усилителя подается переменное напряжение. Усиление напряжения приводит в действие реверсивный двигатель *10*, который через механическую передачу вращает профилированный диск *9* и указатель *7*. Двигатель работает до тех пор, пока диск не установит сердечник катушки *8* вторичного прибора в такое же положение, в каком на-

ходится сердечник в катушке *4* ротаметра. В этом случае напряжение разбаланса уменьшается до нуля и двигатель останавливается. При изменении направления движения сердечника *3* напряжение разбаланса изменяется также и по фазе, что приводит к вращению двигателя в обратном направлении до момента установления равновесия.

Электронный усилитель имеет схему, принципиально такую же, как и усилитель уравновешенных мостов для измерения температуры с питанием переменным током.

На рис. 4. 26 приведена схема ротаметра с пневматической системой передачи. Движения поплавка передаются заслонке *10* через магнитный сердечник *3* и наружный магнит *4*. Пневматическая система действует аналогично системе, описанной выше для манометра с пневмопередачей (см. гл. 2, рис. 2.16.) Для устранения возможных колебаний наружного магнита добавлен гидравлический успокоитель *8*. Вторичный прибор на рис. 4.26 не показан. Это манометр с пределами измерений 0,2—1 *кГ/см*², но со шкалой, градуированной в единицах расхода.

§ 4. МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

В последние годы стали применять приборы, которые измеряют расход в единицах массы. Эти приборы называются массовыми расходомерами.

В условиях промышленности измерение массового расхода дает ряд преимуществ.

Массовый расход можно вычислить умножением объемного расхода на плотность измеряемого вещества, а также измерить специальными приборами.

На рис. 4.27 показана блок-схема массового расходомера газа с диафрагмой. Вместе с перепадом должны измеряться температура и давление, от которых зависит плотность газа. Результаты измерения этих трех параметров, преобразованные в электрические величины в особых датчиках,

Рис. 4. 27. Схема массового расходомера с диафрагмой.

1 — датчик температуры; *2* — датчик давления; *3* — диафрагма; *4* — датчик перепада; *5* — счетно-решающее устройство; *6* — регистратор.

передаются на вход счетно-решающего устройства, которое выдает окончательный результат измерения в единицах массы регистратору.

На рис. 4. 28 показана схема массового расходомера электромеханического действия. Два колеса *2* и *6* с разными углами наклона лопастей соединены между собой спиральной пружиной *4*. Вследствие разного наклона лопастей под действием потока колеса смещаются относительно друг друга на угол, пропорциональный массовому расходу. В то же время оба колеса непрерывно вращаются. При помощи индукционных датчиков *3* и *5* и небольших металлических пластин на каждом колесе измеряется угол смещения. Датчики включены в схему электронного генератора импульсов. При прохождении металлической пластины под датчиком *3* схема генератора

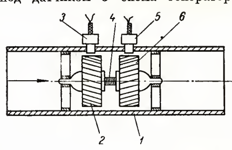


Рис. 4. 28. Схема массового расходомера электромеханического действия.

1 — трубопровод; *2* и *6* — лопастные колеса; *3* и *5* — электрические индукционные датчики; *4* — пружина.

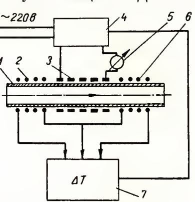


Рис. 4. 29. Схема массового расходомера теплового действия.

1 — трубопровод; *2* и *6* — обмотки термометров сопротивления; *3* — нагревательная обмотка; *4* — регулируемый блок питания; *5* — ваттметр; *7* — прибор, измеряющий разность температур термометров.

открывается и подсчитываются импульсы электронным счетчиком. При прохождении пластины второго колеса под датчиком *5* выход генератора закрывается и подсчет импульсов прекращается. Число импульсов пропорционально углу смещения, а число оборотов пропорционально скорости потока. Таким способом измеряется величина, пропорциональная моменту количества движения, деленного на скорость потока, по которой можно вычислить массовый расход.

Массовые расходомеры, основанные на описанном принципе, имеют погрешность 1—2% и выпускаются для установки на трубопроводах диаметром до 250 *мм* на достаточно большие расходы жидкости или газа.

На рис. 4. 29 приведена схема массового расходомера, основанного на тепловом принципе. На участке трубы измеряемого потока с наружной стороны расположены нагревательная обмотка *3* и две

обмотки *2* и *6* термометров сопротивления для измерения разности температуры до и после нагревательной обмотки. Жидкость (или газ), протекающая по трубопроводу, нагревается теплом обмотки. Степень нагрева зависит от массового расхода жидкости или газа и от количества подводимого тепла.

Если поддерживать степень нагрева постоянной, то весовой расход газа будет характеризоваться величиной электрической мощности, потребляемой нагревателем. Прибор, измеряющий разность температур, регулирует мощность нагревателя и поддерживает эту разность постоянной.

Такой прибор применяют при измерениях небольших массовых расходов жидкостей или газов в тех случаях, когда недопустимо устанавливать что-либо внутри трубопровода из-за коррозийности среды или других причин.

§ 5. ИНДУКЦИОННЫЙ РАСХОДОМЕР

Для измерения расхода различных электропроводящих жидкостей разработаны индукционные или, как их еще называют, электромагнитные расходомеры (рис. 4. 30). Датчик состоит из участка трубы *1*, покрытой внутри слоем *2* твердой резины. Труба из немаг-

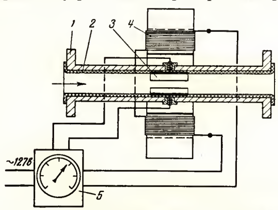


Рис. 4. 30. Схема индукционного (электромагнитного) расходомера.

1 — труба; *2* — резиновое покрытие; *3* — электроды; *4* — электромагнит; *5* — измерительный прибор.

нитной нержавеющей стали. Внутри трубы смонтированы два электрода *3* также из нержавеющей стали, изолированные от стенок. Труба заключена между полюсами электромагнита *4*, питаемого переменным током. Электроды соединены проводами с измерительным прибором *5*.

В протекающей по трубе жидкости индуктируется переменная э. д. с., пропорциональная по величине объемному расходу. При помощи электродов эта э. д. с. передается на вход измерительного прибора.

Измерительный прибор имеет электронный усилитель для усиления э. д. с., а также снабжен шкалой и указателем.

Индукционные расходомеры пригодны для измерения расхода растворов агрессивных кислот, щелочей и других жидкостей, имеющих удельную электропроводность не менее 10^{-4} *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$. Погрешность комплекта $\pm 2{,}5\%$ от диапазона шкалы. Рассчитаны на работу при давлении потока до 25 *кГ/см*^{2}. Производительность от 0,32 до 50 *м*^{3}*/ч*. Диаметр трубки от 10 до 80 *мм*. Не пригодны для измерения расхода нефтей и нефтепродуктов, имеющих очень малую удельную электропроводность.

§ 6. РАСХОДОМЕР СЫПУЧИХ ТЕЛ

Для измерения расхода сыпучего катализатора на установках каталитического крекинга применяют шнековые расходомеры (рис. 4. 31). Катализатор, двигаясь вниз по трубе под действием своего веса, вращает шнек, число оборотов которого измеряется счетчиком оборотов с электрической передачей показаний (тахогенератором, счетчиком импульсов и др.) на вторичный прибор. Число оборотов шнека пропорционально объемному расходу катализатора. Прибор может иметь шкалу и в единицах массового расхода.

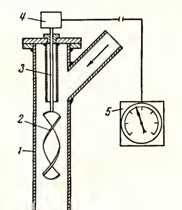


Рис. 4. 31. Схема расходомера сыпучих тел.

1 — труба; *2* — шнек; *3* — вал шнека; *4* — счетчик оборотов с электропередачей показаний; *5* — вторичный прибор.

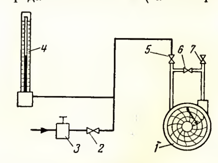


Рис. 4. 32. Схема для поверки поплавкового дифференциального манометра.

1 — дифференциальный манометр; *2* — вентиль; *3* — редуктор давления; *4* — однотрубный манометр; *5* — вентиль поплавковой камеры; *6* — уравнительный вентиль; *7* — вентиль сменной камеры.

§ 7. ПОВЕРКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МАНОМЕТРА И ОБРАБОТКА ДИАФРАГМ РАСХОДОМЕРОВ ПЛАНИМЕТРОМ. ПОВЕРКА РОТАМЕТРА

Схема для поверки дифференциального манометра приведена на рис. 4. 32. Устанавливаем на проверяемый прибор 100%-ную расходную диаграмму с неравномерными делениями. Вычисляют

значения перепада h для точек диаграммы 30, 40, 50, 60 и 80% по формуле

$$h=\left(\frac{n}{100}\right)^2 h_{max}, \tag{4. 49}$$

где n — значение поверяемой точки в процентах неравномерной диаграммы;

h_{max} — верхний предел измерения дифференциального манометра в *мм рт. ст.*

Проверяют точку нуля поверяемого прибора, для чего открывают уравнительный вентиль *6*. Если стрелка устанавливается выше нулевого деления, то добавляют ртуть, если ниже, отливают, как указано в инструкции к прибору.

Проверяют схему на герметичность: вентили *2*, *5* и *7* открывают и редуктором *3* повышают давление до величины, при которой стрелка прибора устанавливается на верхний предел по диаграмме. Закрывают вентиль *2*. Стрелка не должна смещаться в сторону уменьшения показаний. В случае смещения это означает, что система трубок негерметична. Место утечки находят смачиванием мест соединения мыльной водой. После создания полной герметичности приступают к поверке.

Пример. По формуле (4. 49) значения перепада для дифференциального манометра с пределами измерения 0—400 *мм рт. ст.* для поверяемых точек 30, 40, 50, 60 и 80% составляют соответственно 36, 64, 100, 144 и 256 *мм рт. ст.*

Создадим давление в системе такое, чтобы стрелка прибора точно установилась на делении первой поверяемой точки 30%, и запишем показания образцового манометра. Таким же способом поверим все другие точки при прямом ходе стрелки и обратном. Составим таблицу результатов поверки (табл. 4. 2).

Таблица 4.2

Результаты поверки дифференциального манометра

Поверяемая точка, % шкалы	h, *мм рт. ст.*	Показания образцового манометра		Погрешность в % от h_{max}		Вариация $(d_1 - d_2)$, %
		при прямом ходе, h_1	при обратном ходе, h_2	при прямом ходе, d_1	при обратном ходе, d_2	
30	36	38	34	0,5	—0,5	1,00
40	64	68	64	1,00	0,0	1,00
50	100	102	101	0,50	0,25	0,25
60	144	142	145	—0,50	0,25	0,75
80	256	262	260	1,50	1,0	0.50
100	400	404	398	1,00	—0,5	1,50

Вычисляем относительную погрешность при прямом ходе и обратном по формуле

$$d_{1,2}=\frac{h_{1,2}-h}{h_{\max}}100 \qquad (4.50)$$

и вариацию показаний как абсолютную разность между погрешностями при прямом и обратном ходе.

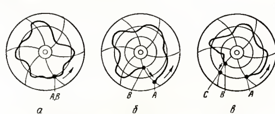


Рис. 4. 33. Виды кривых записи давления или расхода на диаграмме самопишущего прибора.

При обработке диаграмм расходомеров обводим планиметром кривые записи давления и расхода, как показано на рис. 4. 33.

Если начало и конец суточной кривой совпадут, то точка окончания обвода совпадает с точкой начала обвода (рис. 4. 33, *а*) Если

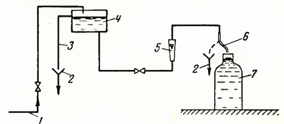


Рис. 4. 34. Схема для поверки ротаметра.

1 — водопровод; *2* — устройство для сброса воды в канализацию; *3* — переточная линия; *4* — напорный бак; *5* — поверяемый ротаметр; *6* — гибкий шланг; *7* — мерная бутыль.

точка окончания суточной кривой не совпадает с точкой ее начала, то после доведения обводного штифта планиметра до точки B проведем еще его по дуге времени до точки A, после чего отсчитаем показания (рис. 4. 33, *б*).

При планиметрировании кривой за неполные сутки после обвода от точки A до точки B проведем обводный штифт еще по дуге времени до точки C, лежащей на окружности точки A начала кривой (рис. 4. 33, *в*).

Пропорциональный планиметр ПП-Б при обводе суточной кривой давления дает трехзначный отсчет. Отделяя первые две цифры полученного значения, получим среднесуточный радиус в процентах.

Например, если значение равно 675, то среднесуточный радиус равен 67,5%. Если шкала давления прибора имеет пределы измерения 0—6 *кГ/см²*, то среднесуточное давление равно $67{,}5 \cdot 6 : 100 = 4{,}05$ *кГ/см²*

Корневой планиметр ПК-В имеет поправочный множитель K, равный 0,1333.

Для получения среднесуточного радиуса кривой расхода в процентах неравномерной расходной диаграммы значение корневого планиметра надо умножить на 0,1333. Например, если значение равно 684, то среднесуточный радиус будет $684 \cdot 0{,}1333 = 91{,}17\%$.

Среднечасовой расход за сутки определяют умножением среднесуточного радиуса на верхний предел измерения прибора в единицах расхода. Так, если для обрабатываемой диаграммы верхний предел расхода равен 250 *м³/ч*, то среднечасовой расход за сутки будет $91{,}17 \cdot 250 : 100 = 227{,}9$ *м³/ч*.

При обработке диаграмм с кривыми за неполные сутки для получения среднечасового радиуса показание планиметра надо умножить на $24/T$, где T число часов записи.

Суточный расход равен среднечасовому, умноженному на 24.

Схема поверки ротаметра приведена на рис. 4. 34. Пользуясь вентилем на трубопроводе перед ротаметром, установим такой расход воды, при котором поплавок установится на поверяемой отметке. Затем направим воду из трубопровода после ротаметра в мерную емкость и включим секундометр. Когда емкость заполнится до верхней отметки, выключим секундомер. Часовой расход определим по формуле

$$Q = \frac{v \cdot 60}{t} \ \text{л/ч}, \qquad (4.51)$$

где v — объем мерной емкости в *л*;

t — время заполнения мерной емкости в *мин*.

Поверку ведем в 4—5 точках шкалы ротаметра. По сопоставлению величин расхода, полученного при поверке, и расхода по тарировочной кривой в поверяемых точках определим погрешность ротаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей газов и пара. Машгиз, 1951.
2. Правила 27-54 по применению и поверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами и трубами Вентури. Стандартгиз, 1960.
3. Теплоэнергетические и химико-технологические приборы и регуляторы. Под редакцией канд. техн. наук П. П. Кремлевского. Машгиз, 1961.
4. Robert Siev. Mass Flow measurement Instruments and Control Systems, v. 33, No. 6, 1960.
5. Лоскутов В. И. Лабораторные приборы для измерения расхода жидкостей и газов. Машгиз, 1955.
6. Ибрагимов И. А. Приборы автоматического контроля и регулирования химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Азнефтеиздат, 1959.
7. Ярковский Э. Основы практических расчетов диафрагм, расходомерных сопел и труб Вентури. Машгиз, 1962.

ГЛАВА 5

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

Измерение уровня жидкости в технологической аппаратуре имеет существенное значение в практике переработки нефти.

В резервуарах для хранения нефтепродуктов измерять уровни требуется при определениях количества находящейся в них жидкости. Измеряют уровни в аппаратах, работающих под давлением, чтобы иметь возможность поддерживать в них необходимый запас жидкости. Определяют уровень раздела двух жидкостей с разными удельными весами, например воды и нефти, а также уровень сыпучих материалов, таких, как твердый шариковый катализатор в аппаратуре установок каталитического крекинга.

§ 1. ИЗМЕРИТЕЛИ УРОВНЯ В РЕЗЕРВУАРАХ

Уровень в резервуарах, работающих при атмосферном или небольшом избыточном давлении (несколько *мм вод. ст.*), определяют поплавковыми устройствами.

На рис. 5. 1 приведена схема поплавкового указателя, позволяющего наблюдать за изменениями уровня в резервуаре. Пустотелый поплавок *5* подвешен к одному концу стальной ленты *4*, выведенной по направляющим роликам *3* наружу. К другому концу ленты подвешен груз *6*, уравновешивающий вес поплавка, с указателем. Указатель перемещается вдоль рейки при изменении уровня в резервуаре. Нижнее положение указателя соответствует высокому уровню и наоборот. Показания отсчитывают визуально. Такое устройство пригодно лишь для наблюдения за положением уровня, но не для точного его измерения.

Схема более совершенной конструкции поплавкового указателя, позволяющего измерять уровень в пределах высоты 0—14 *м* с точностью до 1 *см* и с телепередачей показаний, приведена на рис. 5. 2*. В этом указателе перемещения поплавка *9* направляются двумя

* Разработан ВНИИКАНефтегазом.

вертикальными тросами *8*, натянутыми между днищем и крышей резервуара. Лента *5* из нержавеющей стали с перфорацией заключена в стальной кожух для предотвращения выхода паров из резервуара в атмосферу. Для местного наблюдения за состоянием уровня снаружи около резервуара установлена стойка с показывающим прибором, имеющим шкалу, по которой можно отсчитывать значения в метрах и сантиметрах. Приводится в действие показывающий прибор перфорированной лентой, движение которой вызывается перемещениями поплавка с изменением уровня.

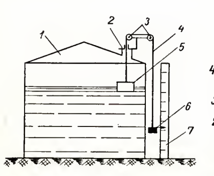


Рис. 5. 1. Схема поплавкового указателя уровня в резервуаре.

1 — резервуар; *2* — люк; *3* — направляющие ролики; *4* — стальная лента; *5* — поплавок; *6* — груз с указателем; *7* — рейка.

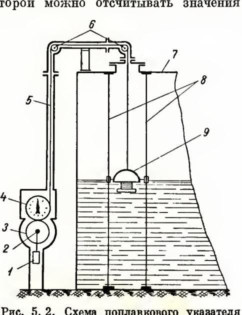


Рис. 5. 2. Схема поплавкового указателя уровня с телепередачей показаний.

1 — груз; *2* — малый шкив для ленты груза; *3* — шкив для намотки ленты поплавка; *4* — шкив показывающего прибора; *5* — стальная лента; *6* — направляющие ролики; *7* — резервуар; *8* — направляющие тросы; *9* — поплавок.

Как показано на схеме, лента огибает ведущий шкив *4* с углом обхвата около 90° и наматывается на шкив *3*, на котором жестко укреплен малый шкив *2* с подвешенным на другой ленте грузом *1*. Под действием этого груза уравновешивается вес поплавка, что облегчает его перемещение вместе с уровнем и создает требуемое натяжение перфорированной ленты. При повышении уровня поплавок *9* поднимается, лента *5* наматывается на шкив *3*, лента груза *1* сматывается и груз опускается. При понижении уровня лента и груз движутся в обратном направлении. Движения ленты *5* передаются ведущему шкиву *4*.

Схема устройства показывающего прибора приведена на рис. 5. 3. Ведущий шкив *6* вращается перфорированной лентой, причем он совершает один полный оборот при перемещении поплавка на 1 *м*.

К оси *1* ведущего шкива прикреплена стрелка *4*, которая показывает высоту уровня в сантиметрах. Значение в метрах отсчитывают по шкале метров, нанесенной на шестерню *5*, через окошко в шкале *3* сантиметров. Шестерня *5* связана с осью *1* через малую шестерню *2*. При одном обороте оси *1* шестерня *5* совершает $^1/_{14}$ оборота, что соответствует изменению уровня на 1 *м*.

Показывающий прибор снабжен телеприставкой, состоящей из реостатного датчика и контактного сигнального устройства. Реостатный датчик представляет собой реохорд *8* с двумя движками *9* и *10*.

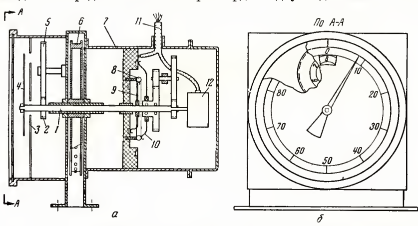


Рис. 5. 3. Схема показывающего прибора поплавкового указателя уровня с телепередачей показаний.

а — устройство; *б*— вид спереди; *1* — главная ось; *2* — малая шестерня; *3* — шкала сантиметров; *4* — стрелка; *5* —шестерня со шкалой метров; *6* — ведущий шкив; *7* — телеприставка; *8* — реохорд; *9* — движок сантиметров; *10* — движок метров; *11* — провода; *12* — сигнальное устройство.

Движок сантиметров *9* закреплен на оси *1* и совершает вместе с ней один оборот при изменении уровня на 1 *м*, а движок метров *10* связан с осью *1* через шестеренчатую передачу и совершает лишь $^1/_{14}$ оборота при изменении уровня на 1 *м*.

Реохорд телеприставки включен в схему электронного уравновешенного показывающего моста сопротивления (рис. 5. 4). Мост питается постоянным током от сухой батареи напряжением 1,5 *в*, поэтому приставка неопасна в пожарном отношении. Напряжение небаланса моста преобразовывается в переменное с частотой 50 *гц* в вибропреобразователе и входном трансформаторе и усиливается в электронном усилителе. Усиленное напряжение небаланса управляет реверсивным двигателем, который перемещает движок реохорда в положение равновесия моста и одновременно перемещает указатель вдоль шкалы прибора, по которой отсчитывают значения уровня. Электронный мост устанавливают в служебном невзрыво-

опасном помещении, которое может находиться на расстоянии до 1000 *м* от резервуара с указателем уровня. По электронному мосту можно в любой момент узнать высоту уровня в резервуаре. Для этого переключатель *К* переводят в положение *М* (метры). К схеме подключается движок метров реохорда телеприставки и определяют по шкале моста число метров. Затем переключатель *К* переводят в положение *См* (сантиметры), к схеме подключается движок санти-

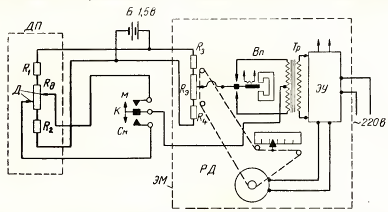


Рис. 5. 4. Электрическая схема поплавкового указателя уровня с телепередачей показаний.

Д — движки реохорда с телеприставками; *ДП* — телеприставка; R_1, R_2, R_3 и R_4 — сопротивления; $R_д$ — реохорд телеприставки; $R_э$ — реохорд электронного моста; *Б* — батарея; *К* — переключатель; *Вп* — вибропреобразователь; *Тр* — входной трансформатор; *ЭУ* — электронный усилитель; *РД* — реверсивный двигатель; *ЭМ* — электронный уравновешенный мост.

метров реохорда телеприставки и мост показывает сантиметры уровня. Если, например, прибор показал сначала 6 *м*, а затем 43 *см*, то уровень в резервуаре находится на высоте 6 *м* 43 *см* от днища.

К электронному мосту может быть подключено через систему переключателей несколько датчиков, установленных на резервуарах, что позволяет определять уровень из одного пункта резервуарного парка.

Сигнальное устройство, имеющееся в телеприставке, служит для передачи сигнала на пульт, где установлен электронный мост, о достижении уровнем крайних верхнего и нижнего значений.

На рис. 5. 5 приведена упрощенная схема поплавкового указателя уровня* с телепередачей, основанного на ином принципе, чем описанный выше. Поплавок в этом устройстве тонущий, он тяжелее жидкости. Такой поплавок называют еще буйком. Поплавок подвешен на перфорированной ленте, огибающей гладкий ролик 9 и ве-

* Разработан СКБ АНН.

дущий ролик *8*. К другому концу ленты подвешен уравновешивающий груз *2*. Гладкий ролик прикреплен к главному рычагу *10*, который может поворачиваться вокруг оси *11*. К правому плечу главного рычага прикреплены пружина *12* и контакт *13*. Ведущий ролик *8* укреплен на неподвижной оси и может вращаться реверсивным электродвигателем *6* через червячную передачу. Пружина главного

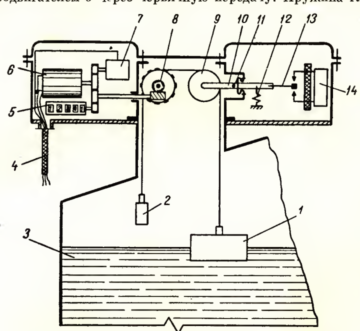


Рис. 5. 5. Схема указателя уровня с тонущим поплавком.

1 — тонущий поплавок; *2* — груз; *3* — резервуар; *4* — электропровод; *5* — цифровой указатель; *6* — реверсивный электродвигатель; *7* — телеприставка; *8* — ведущий ролик; *9* — гладкий ролик; *10* — главный рычаг; *11* — ось главного рычага; *12* — пружина; *13* — контакт; *14* — релейный блок.

рычага рассчитана так, что при погружении поплавка на половину его высоты главный рычаг находится в равновесии, занимает горизонтальное положение и его контакт не замыкается с контактами релейного блока *14*. Если уровень в резервуаре повысится, то вес поплавка в жидкости уменьшится (по закону Архимеда) и равновесие нарушится. Главный рычаг повернется по часовой стрелке, замкнется нижний контакт релейного блока и включится реверсивный двигатель. Последний начнет вращать ведущий ролик, и поплавок будет подниматься до тех пор, пока он снова не окажется погруженным на половину своей высоты, после чего контакт разомкнется и двигатель остановится. Если уровень повышается непре-

рывно, то двигатель непрерывно поднимает поплавок. Аналогично действует система и при понижении уровня с той лишь разницей, что вследствие увеличения веса поплавка главный рычаг будет поворачиваться против часовой стрелки, замкнется верхний контакт релейного блока, включится реверсивный двигатель, но вращаться он будет в обратном направлении и поплавок будет опускаться, следуя за уровнем. При прекращении понижения уровня поплавок достигнет среднего погружения, контакты разомкнутся и снова восстановится положение равновесия главного рычага.

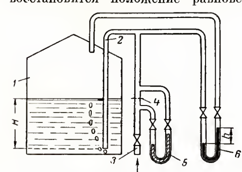


Рис. 5. 6. Схема гидростатического уровнемера.

1 — резервуар; 2 — трубка ввода воздуха; 3 — линия входа сжатого воздуха; 4 — диафрагма; 5 — дифференциальный манометр, заполненный маслом; 6 — дифференциальный манометр, заполненный ртутью.

Входной величиной устройств для телепередачи показаний используется вращение вала реверсивного двигателя, число оборотов которого пропорционально высоте уровня. В системе телепередачи применена схема с двумя сельсинами, один из которых приводится во вращение реверсивным двигателем, а второй, повторяющий это вращение, находится в приемном устройстве (на схеме не показано), которое может быть смонтировано на большом расстоянии от резервуара. Кроме телепередачи, имеется еще цифровой счетчик, показывающий высоту уровня в миллиметрах. Максимальная высота измеряемого уровня составляет 10 *м*. Погрешность измерения ± 5 *мм*. Указатель снабжен устройством для сигнализации о достижении поплавком крайних верхнего и нижнего уровней. Все детали устройства, располагаемые на резервуаре, заключены во взрывонепроницаемый металлический корпус.

Конструкция указателя уровня с тонущим поплавком позволяет применять его и для резервуаров, работающих под давлением до 6 *кГ/см*^{2}.

На рис. 5. 6 приведена схема гидростатического уровнемера, применяемого для измерения уровня нефтепродуктов и агрессивных жидкостей, растворов кислот, щелочей и т. п. (такие приборы называются еще и пьезометрическими). Действие уровнемера основано на измерении давления воздуха или газа, пропускаемого через жидкость, величина которого пропорциональна гидростатическому давлению столба жидкости в резервуаре. Трубку, через которую подается воздух, опускают почти до дна резервуара. Наблюдение за давлением подаваемого воздуха ведут по дифференциальному

манометру с масляным заполнением, измеряющим перепад давления на диафрагме. Гидростатическое давление столба жидкости определяют по показаниям дифференциального манометра с ртутным заполнением. Высоту H жидкости в резервуаре вычисляют по формуле

$$H = \frac{h\,\gamma_р}{\gamma_ж}, \qquad (5.1)$$

где h — разность уровней ртути в дифференциальном манометре в *м*;
$\gamma_р$ — удельный вес ртути в $кГ/м^3$;
$\gamma_ж$ — удельный вес жидкости в $кГ/м^3$.

Если известна площадь F сечения резервуара и если эта площадь постоянна по высоте, то по показаниям ртутного дифференциального манометра можно непосредственно определить вес жидкости в резервуаре. Это следует из уравнения

$$FH\,\gamma_ж = Fh\,\gamma_р. \qquad (5.2)$$

Левая часть этого уравнения есть вес жидкости в резервуаре.

Дифференциальные манометры могут быть отнесены на достаточно большое расстояние от резервуара, что создает благоприятные условия для дистанционного измерения. Погрешность гидростатического уровнемера около ± 5 *мм* столба жидкости в резервуаре. Однако большого распространения этот вид приборов не получил из-за ряда неудобств по снабжению их сжатым воздухом, коррозии и закупорке трубки для воздуха, погружаемой в резервуар, и некоторым другим причинам.

§ 2. ИЗМЕРИТЕЛИ УРОВНЯ В АППАРАТАХ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Для наблюдения за высотой уровня жидкости в технологических аппаратах, в которых по условиям их эксплуатации должен сохраняться определенный объем жидкости, применяют большое число разнообразных по своему принципу действия и по конструкции приборов. К этим приборам не предъявляют таких жестких требований в отношении их погрешности, как к приборам и устройствам, измеряющим уровень в резервуарах для учета нефтепродуктов.

Наиболее простым и давно применяемым в промышленности устройством является уровнемерное стекло. Для аппаратов, работающих при атмосферном или избыточном давлении до 10 $кГ/см^2$ и при невысоких температурах, применяют устройство со стеклянной прозрачной трубкой, закрепленной в арматуре с отключающими вентилями (рис. 5. 7). Для предохранения от выброса нефтепродукта в случае поломки стеклянной трубки вентили снабжены шаровыми клапанами, перекрывающими выходное отверстие под действием давления в аппарате. Стекло имеет длину 400—500 *мм* и устанавливается на высоте требуемого уровня. Когда необходимо увеличить

12 Заказ 1042.

диапазон измерения, устанавливают 2—3 стекла, как показано на рис. 5. 8.

Для аппаратов, работающих при давлениях от 10 до 25 $кГ/см^2$, применяют устройство с плоским прочным стеклом, закрепленным в специальную защитную арматуру (рис. 5. 9). Такое устройство называют еще уровнемерным стеклом отраженного света.

Большое распространение получили уровнемеры с плавающим шаровым металлическим поплавком. Они выпускаются различных видов для аппаратов, работающих под давлением до 64 $кГ/см^2$, а иногда и выше. На рис. 5. 10 приведена схема камерного уровнемера внешнего монтажа. Поплавок расположен внутри стальной камеры. Вес его уравновешен грузом. Поплавок перемещается вверх и вниз вместе с уровнем жидкости. Он укреплен на штанге, покоящейся на оси, выведенной через сальник наружу. Перемещения поплавка передаются указателю.

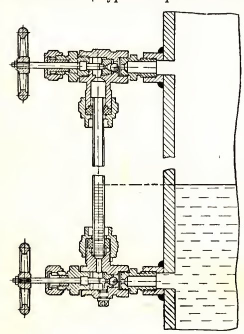


Рис. 5. 7. Уровнемерное стекло.

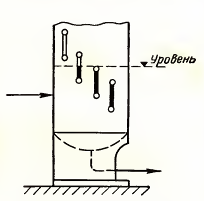


Рис. 5. 8. Установка нескольких уровнемерных стекол.

Для передачи показаний на расстояние поплавковое устройство имеет телеприставку пневматического действия, которую называют еще пневмореле. Схема одного из пневмоустройств уровнемеров приведена на рис. 5. 11. Главный рычаг связан с рычагом поплавкового устройства, на котором укреплен груз (рис. 5. 10). При повышении уровня главный рычаг перемещается вниз и давит на шток пневмоустройства (рис. 5. 11). Шток, перемещаясь вниз, давит на сильфон с пружиной, прикрывает выходной клапан и открывает

входной. Воздух из линии питания поступает через входной клапан в камеру сильфона и в линию выхода. Давление выходного воздуха повышается. При понижении уровня главный рычаг и шток поднимаются, прикрывается входной и открывается выходной клапан. Воздух из линии выхода сбрасывается в атмосферу через полый шток, и выходное давление понижается.

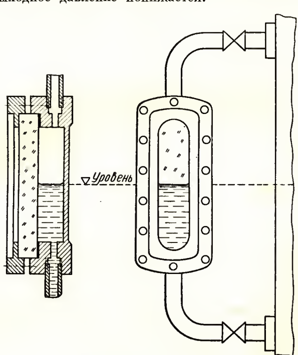


Рис. 5. 9. Уровнемерное стекло отраженного света.

Каждому значению уровня в пределах перемещения поплавка соответствует определенное значение давления воздуха на выходе из пневмоустройства. Так, например, если уровень повысился на некоторую величину и затем перестал повышаться, то и шток пневмоустройства опустится на некоторую часть своего хода и остановится. Давление воздуха на выходе повысится также на некоторую конечную величину и будет поддерживаться постоянным до тех пор, пока уровень не изменится. Это достигается действием сильфона обратной связи. Сильфон при неподвижном штоке от повышения давления на выходе сжимается и вызывает прикрытие входного и открытие выходного клапана, через который часть воздуха сбрасывается в атмосферу через полый шток. Такое действие пневмоустрой-

ства и создает пропорциональную зависимость между высотой уровня и давлением воздуха на выходе.

В качестве вторичного прибора используется обычный манометр с трубчатой пружиной с пределами измерения 0—1 *кГ/см²*. На шкалу такого манометра наносят условные деления. Нижний предел шкалы обозначают буквой Н (низкий), а верхний буквой В (высокий). Вторичный прибор может быть удален от пневмоустрой-

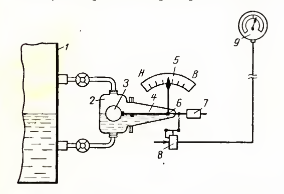


Рис. 5. 10. Схема камерного поплавкового уровнемера.

1 — аппарат с жидкостью; *2* — поплавковая камера; *3* — поплавок; *4* — шток поплавка; *5* — шкала; *6* — ось вращения с указателем; *7* — груз; *8* — пневмоустройство; *9* — вторичный прибор.

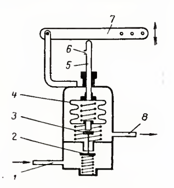


Рис. 5. 11. Схема пневмоустройства поплавкового уровнемера.

1 — линия питания сжатым воздухом давлением 1,2 *кГ/см²*; *2* — входной клапан; *3* — выходной клапан; *4* — сильфон обратной связи; *5* — пустотелый шток; *6* — отверстие для сброса воздуха; *7* — главный рычаг; *8* — линия выхода.

ства на расстояние до 150 *м*. Между ними прокладывают металлическую или пластмассовую трубку внутренним диаметром 4—8 *мм*.

На рис. 5. 12 показаны схемы фланцевого и штуцерного поплавковых уровнемеров внутреннего монтажа.

Фланцевый уровнемер более удобен в эксплуатации и применяется в аппаратах большого диаметра (более 1 *м*), а штуцерный в аппаратах малого диаметра (до 1 *м*), в которых нет люка. Эти уровнемеры имеют пневмоустройство для передачи показаний на расстояние (на рисунке не показано).

К числу поплавковых относятся уровнемеры с тонущим поплавком, или буйковые, основанные на изменении веса поплавка при погружении его в жидкость. Применяются они для аппаратов, работающих как под давлением, так и без давления. На рис. 5. 13 приведена схема распространенного уровнемера с цилиндрическим поплавком, для аппаратов, работающих под давлением. Этот уровнемер имеет пневмоустройство для телепередачи показаний на вторичный прибор.

Измерительная часть уровнемера имеет корпус, в котором размещен цилиндрический поплавок. Поплавок подвешен к горизонтальному рычагу, присоединенному к свободному концу упругой трубки. Другой конец трубки жестко прикреплен к корпусу. Внутри трубки имеется стержень, один конец которого приварен к свободному концу трубки, другой конец стержня, снабженный заслонкой, выступает наружу. При отсутствии жидкости в поплавковой камере вес поплавка уравновешивается силой упругости трубки. При этом трубка закручивается на угол около 4°, поплавок находится в самом низком положении и заслонка не прикрывает сопло.

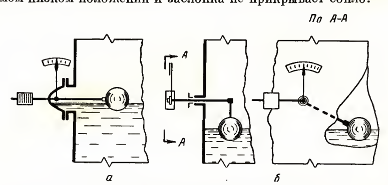


Рис. 5. 12. Схемы поплавковых уровнемеров внутреннего монтажа.
а — фланцевый; *б* — штуцерный.

При повышении уровня поплавок погружается в жидкость и его вес уменьшается. Вследствие этого трубка раскручивается, заслонка приближается к соплу, а поплавок немного приподнимается. Чем больше поплавок погружен в жидкость, тем на больший угол раскрутится трубка и, следовательно, тем ближе заслонка подойдет к соплу. Положение заслонки относительно сопла определяет величину давления воздуха на выходе из пневмоустройства. По величине этого давления и судят о положении уровня. При низком уровне заслонка не прикрывает сопло и давление равно нулю. При самом высоком уровне, когда весь поплавок погружен в жидкость, заслонка полностью прикрывает сопло и давление воздуха на выходе из пневмоустройства максимально и равно 1 *кГ/см*².

Пневмоустройство питается сжатым воздухом давлением 1,2 *кГ/см*². Часть воздуха питания через постоянный дроссель поступает в камеру над большой мембраной и далее по трубке, частично расположенной внутри манометрической пружины, к соплу. Большая мембрана жестко скреплена с малой мембраной. Пространство между мембранами сообщено с атмосферой. Когда заслонка не прикрывает сопло, то весь воздух, поступающий к соплу через дроссель, выходит в атмосферу и давление в камере над большой

мембраной равно атмосферному. При этом двухседельный клапан прикрывает нижнее входное отверстие, не закрывая верхнее. Воздух из линии питания в линию выхода не поступает, и давление на выходе равно нулю. Когда заслонка прикрывает сопло, то давление над большой мембраной повышается и обе мембраны прогибаются вниз. Выходное отверстие закрывается, а входное открывается, и давление в линии выхода повышается. Для создания пропорциональной за-

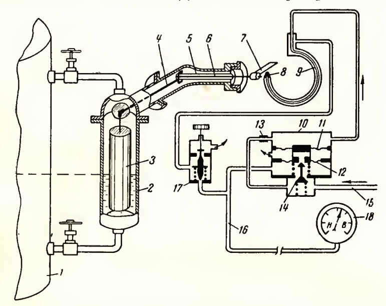


Рис. 5. 13. Схема уровнемера с цилиндрическим поплавком.

1 — аппарат с жидкостью; 2 — корпус; 3 — поплавок; 4 — рычаг; 5 — упругая трубка; 6 — стержень; 7 — заслонка; 8 — сопло; 9 — манометрическая пружина; 10 — пневмоустройство; 11 — большая мембрана; 12 — малая мембрана; 13 — постоянный дроссель; 14 — двухседельный клапан; 15 — линия питания; 16 — линия выхода; 17 — дроссель настройки обратной связи; 18 — вторичный прибор.

висимости между изменением уровня и величиной выходного давления воздуха предусмотрен узел обратной связи, состоящий из манометрической пружины, на которой закреплено сопло. В эту пружину подается воздух из линии выхода через регулируемый дроссель настройки. Когда, например, уровень увеличится на некоторую величину, то заслонка приблизится к соплу. Это вызовет повышение выходного давления воздуха также на некоторую величину. Если бы не было звена обратной связи, то это давление повысилось бы до максимума. Действием же обратной связи сопло несколько отводится от заслонки при возрастании давления в манометрической пружине, и выходное давление больше не возрастает. Аналогично действует обратная связь и при понижении уровня. Таким образом,

каждому значению уровня соответствует строго определенное давление воздуха на выходе из пневмоустройства.

Пределы измерения уровня определяются длиной поплавка. Выходное давление пневмоустройства изменяется от 0 до 1 *кГ/см*². В качестве вторичного прибора здесь также используется обычный манометр с пределами 0—1 *кГ/см*², который может быть удален от уровнемера на расстояние до 150 *м*.

Недостаток уровнемеров с тонущим поплавком — отсутствие указывающего устройства, механически связанного с поплавком. Если положение заслонки относительно сопла почему-либо нарушено, то прибор будет давать неверные показания. Для контроля уровня рядом с такими уровнемерами устанавливают стеклянный указатель уровня. Настройкой дросселя узла обратной связи можно изменять диапазон изменения уровня, в пределах которого выходное давление из пневмоустройства будет изменяться от 0 до 1 *кГ/см*². При снижении давления в манометрической пружине этот диапазон уменьшается.

Рис. 5. 14. Схема измерения уровня дифференциальным манометром.

1 — дифференциальный манометр; *2* — аппарат с жидкостью; *3* — замерные штуцера; *4* — разделительные сосуды.

Уровнемеры с тонущим поплавком применяют также для измерения уровня в резервуарах и емкостях, работающих под давлением, в диапазоне до нескольких метров. При монтаже поплавок через люк в крыше опускают внутрь резервуара или емкости, а упругую трубку и пневмореле устанавливают снаружи на крыше резервуара.

Для определения уровня в аппаратах, работающих под давлением, применяют еще и дифференциальные манометры, диапазон измерения которых может быть значительно больше, чем у поплавковых устройств.

Измерение уровня дифференциальным манометром основано на уравновешивании гидростатического давления давлением столба ртути (рис. 5. 14). Статическое давление в аппарате не влияет на показания прибора, так как оно действует на оба колена дифференциального манометра.

Максимальный перепад соответствует низшему, а минимальный высшему уровню. При измерениях уровня тяжелых нефтепродуктов

на соединительных трубках на уровне штуцеров нижнего и верхнего пределов устанавливают разделительные сосуды. Диаметр сосудов должен быть достаточно большим (120—150 *мм*), чтобы при перемещениях ртути в дифференциальном манометре изменения уровня разделительной жидкости в сосудах были малы и практически не влияли на показания. Разделительная жидкость должна иметь удельный вес больше, чем жидкость в аппарате, и не должна смешиваться с ней.

Расстояние L (рис. 5. 14) между замерными штуцерами равно:

$$L = H_1 - H_2 - \Delta h,$$

$$H_1 - H_2 = L + \Delta h, \qquad (5.3)$$

где $\Delta h = h_1 - h_2$ — разность уровней ртути в дифференциальном манометре.

Напишем условия равновесия сил, действующих на площадку *аб* соединительной трубки дифференциального манометра, когда уровень находится на высоте верхнего штуцера (перепад имеет минимальное значение, т. е. $\Delta h = \Delta h_{\min}$):

$$H_1 \gamma_2 + h_2 \gamma_3 = L \gamma_1 + H_2 \gamma_2 + h_1 \gamma_3,$$

откуда

$$\Delta h_{\min} \gamma_3 = (H_1 - H_2) \gamma_2 - L \gamma_1, \qquad (5.4)$$

где γ_1 — удельный вес жидкости в аппарате;

γ_2 — удельный вес разделительной жидкости, причем $\gamma_2 > \gamma_1$;

γ_3 — удельный вес ртути.

Подставляя в (5. 4) значение $(H_1 - H_2)$ из (5. 3) и решая относительно $\Delta h_{\min}$, получим

$$\Delta h_{\min} = \frac{L(\gamma_2 - \gamma_1)}{\gamma_3 - \gamma_2}. \qquad (5.5)$$

Для определения максимального значения перепада $\Delta h_{\max}$ напишем условие равновесия сил, когда уровень находится на высоте нижнего замерного штуцера:

$$H_1 \gamma_2 + h_2 \gamma_3 = H_2 \gamma_2 + h_1 \gamma_3.$$

Заменяя $h_1 - h_2 = \Delta h_{\max}$, получим

$$\Delta h_{\max} \gamma_3 = (H_1 - H_2) \gamma_2. \qquad (5.6)$$

Подставив $L + \Delta h_{\max}$ согласно (5.3) вместо $(H_1 - H_2)$, будем иметь

$$\Delta h_{\max} = \frac{L \gamma_2}{\gamma_3 - \gamma_2}. \qquad (5.7)$$

По формулам (5. 5) и (5. 7) можно определить требуемые пределы измерения дифференциального манометра по перепаду при заданных пределах изменения уровня по высоте и при заданном L.

При измерениях уровня используют дифференциальные манометры с телепередачей электрической или пневматической, описанные в главе 4. Шкала таких приборов обычно имеет нуль посредине, что соответствует среднему уровню.

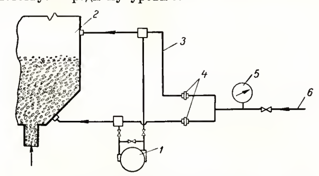


Рис. 5. 15. Схема измерения уровня псевдоожиженного слоя пылевидного катализатора.

1 — дифференциальный манометр; 2 — реактор; 3 — трубки для воздуха; 4 — дроссель (диафрагмы); 5 — манометр; 6 — линия входа воздуха.

Дифференциальным манометром измеряют уровень псевдоожиженного слоя в реакторах установок каталитического крекинга с пылевидным катализатором (рис. 5. 15). Участки трубок над разделительными сосудами непрерывно продуваются воздухом или инертным газом при давлении немного выше, чем в реакторе.

Сжатый воздух не позволяет попасть катализатору в соединительные трубки и тем самым предотвращает их забивание. Такой способ применяется также и при измерении уровня коррозирующих жидкостей.

§ 3. ИЗМЕРИТЕЛИ МЕЖФАЗОВОГО УРОВНЯ

В некоторых процессах большое значение имеет определение уровня воды под слоем нефти или какого-либо нефтепродукта. Приборы, используемые для этой цели, называются межфазовыми измерителями уровня. В качестве межфазовых измерителей уровня могут быть использованы устройства с поплавком, плавающим на воде и тонущим в нефти. Применяют также устройства с тонущим поплавком, в которых используется разница в удельных весах двух жидкостей. Однако они требуют индивидуальной тарировки и контроля показаний дополнительными устройствами или приборами. Большого распространения эти устройства не получили.

В последнее время стали применять электрические устройства, в которых используется различие в электропроводности нефти и воды. Эти устройства служат для целей сигнализации, а также под-

держания межфазового уровня на определенной заданной высоте. Схема одного из межфазовых регуляторов уровня электропневматического действия* приведена на рис. 5. 16. Чувствительным элементом датчика *11* является изолированный от корпуса электрод, к которому подается напряжение около 30 *в* постоянного тока. В цепь электрода включена обмотка реле *4*. Пока электрод находится в

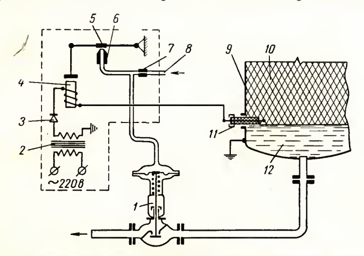


Рис. 5. 16. Схема межфазового регулятора уровня электропневматического действия.

1 — регулирующий клапан; *2* — силовой трансформатор; *3* — выпрямитель; *4* — реле; *5* — заслонка; *6* — сопло; *7* — постоянный дроссель; *8* — линия питания сжатым воздухом давлением 1,2 *кГ/см²*; *9* — аппарат; *10* — нефть; *11* — датчик; *12* — вода.

нефти, которая имеет небольшую электропроводность, ток в цепи электрода весьма мал и реле не возбуждается. Заслонка *5* не прикрывает сопло *6*, и давление воздуха над мембранным приводом регулирующего клапана *1* равно атмосферному, под действием пружины клапан находится в закрытом положении. Когда уровень воды в аппарате повышается до электрода, то вследствие электропроводности воды цепь электрода через заземленный корпус замыкается, реле возбуждается и заслонка прикрывает сопло. Сжатый воздух, не имея выхода в атмосферу, накапливается в трубках и в полости над мембраной клапана, его давление повышается до 1 *кГ/см²*, и клапан открывается. Вода удаляется из аппарата до тех пор, пока электрод снова не погрузится в нефть. Путем включения в схему дополнительных контактов реле эти приборы снабжаются еще сигнальными лампами или звонком. Такие приборы применяются для

* Разработан Новоуфимским нефтеперерабатывающим заводом.

сигнализации и поддержания на определенной высоте уровня воды в электродегидраторах электрообессоливающих установок, а также для сброса подтоварной воды из резервуаров для хранения нефти. Недостаток схемы — загрязнение электрода нефтепродуктом и необходимость в его периодической чистке.

§ 4. УРОВНЕМЕР СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Для измерения уровня сыпучих материалов, таких, как, например, шариковый катализатор, в регенераторах установок каталитического крекинга применяют специальные устройства, в которых

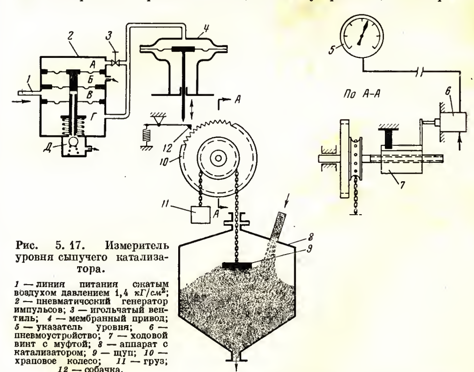


Рис. 5.17. Измеритель уровня сыпучего катализатора.

1 — линия питания сжатым воздухом давлением 1,4 $кГ/см^2$; *2* — пневматический генератор импульсов; *3* — игольчатый вентиль; *4* — мембранный привод; *5* — указатель уровня; *6* — пневмоустройство; *7* — ходовой винт с муфтой; *8* — аппарат с катализатором; *9* — щуп; *10* — храповое колесо; *11* — груз; *12* — собачка.

используется метод «ощупывания». Схема одного из таких уровнемеров* приведена на рис. 5.17. Основной деталью является щуп *9*, подвешенный через блок храпового колеса *10* и уравновешенный грузом *11*. Щуп периодически, через равные промежутки времени, приподнимается и затем опускается на поверхность сыпучего катализатора. Поднимается щуп при помощи пневматического мембранного

* Разработан ГрозНИИ и Новокуйбышевским нефтеперерабатывающим заводом.

силового привода *4*, воздействующего на собачку *12*, а опускается под действием собственного веса в момент отпускания собачкой храпового колеса. Если уровень не изменяется, то щуп поднимается и опускается на одинаковую величину и его среднее положение по высоте не изменяется. Если же уровень понижается или повышается, то щуп будет постепенно опускаться и подниматься. При перемещении щупа вниз или вверх храповое колесо вращается. На его оси укреплен ходовой винт с муфтой *7*. Вращательное движение винта преобразуется в возвратно-поступательное движение муфты. Последняя воздействует на пневмоустройство *6*. Система щупа и ходового винта рассчитана так, что при изменении уровня в заданном диапазоне муфта совершает ход, соответствующий полному ходу штока пневмоустройства. Давление сжатого воздуха на выходе из пневмоустройства при этом изменяется от 0,2 до 1 *кГ/см²*. Схема и действие пневмоустройства описаны выше (см. рис. 5. 11). Таким образом, положения щупа, характеризующие высоту уровня, преобразовываются в пропорциональные значения давления воздуха на выходе из пневмоустройства. В качестве указателя используется манометр *5*, шкала которого отградуирована в единицах высоты уровня. Указатель уровня может быть удален от пневмоустройства на расстояние до 150 *м*.

Для приведения в действие мембранного пневмопривода служит пневматический генератор импульсов, называемый еще пневматическим реле времени. Генератор питается сжатым воздухом давлением 1,4 *кГ/см²* и состоит из сборки трех круглых мембран, штока с соплом для прохода воздуха, шарикового клапана и ряда камер *А*, *Б*, *В*, *Г* и Д. Воздух из линии питания поступает в камеру *В* и через сопло в камеру *Г* и далее по трубке в пространство над мембраной пневмопривода *4*.

Одновременно через игольчатый вентиль *3* воздух поступает в камеру *А* генератора импульсов. По мере накопления давления в камере *А* сборка мембран прогибается вниз, и, наконец, сопло прикасается к шариковому клапану и отводит его вниз. При этом воздух из мембранного привода через камеру Д быстро сбрасывается в атмосферу, давление в камере *А* также понижается, сборка мембран под действием пружин приподнимается и цикл повторяется. Регулировкой игольчатого вентиля *3* можно изменять время между импульсами от 5 *сек* до 15 *мин*, причем прикрытие вентиля увеличивает это время.

Описанным уровнемером можно измерять уровень в пределах до 10 *м* с погрешностью около ± 10 *см*.

§ 5. РАДИОАКТИВНЫЕ УРОВНЕМЕРЫ

В радиоактивных уровнемерах используется большая проницательная способность γ-излучения и поглощения его атомами веществ. Закон ослабления γ-излучения выражается формулой

$$J = J_0 e^{-\mu_м \varrho d}, \tag{5.8}$$

где J_0 — интенсивность потока излучения, падающего на поглотитель;

J — интенсивность потока излучения, прошедшего через слой поглотителя;

$\mu_м$ — массовый коэффициент поглощения в *см²/г*;

ϱ — плотность поглотителя в *г/см³*;

d — толщина слоя поглотителя в *см*;

e — основание натуральных логарифмов.

Схема простого радиоактивного уровнемера приведена на рис. 5. 18. Источник излучения в виде проволоки из кобальта-60 (Co^{60})

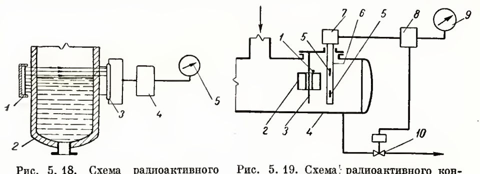


Рис. 5. 18. Схема радиоактивного уровнемера.

1 — источник γ-излучения; *2* — сосуд с жидкостью; *3* — приемник излучения; *4* — электронный блок; *5* — показывающий прибор.

Рис. 5. 19. Схема радиоактивного конденсатоотводчика.

1 — источник γ-излучения; *2* — поплавок; *3* — направляющий стержень; *4* — газосепаратор; *5* — приемники излучения; *6* — трубка; *7* — электрический блок; *8* — управляющий блок; *9* — показывающий прибор; *10* — вентиль с электроприводом.

расположен на заданной высоте. Гамма-излучение проходит через стенки сосуда и попадает на приемник (счетчик Гейгера — Мюллера или другой). Слой жидкости, пересекая пучок лучей, ослабляет интенсивность гамма-излучения, падающего на приемник. Гамма-излучение, воспринимаемое приемником, преобразовывается в электронном блоке в постоянный электрический ток, величина которого измеряется показывающим прибором. Пределы измерения уровня таким прибором определяются длиной излучателя и счетчика. Прибор фиксирует изменение уровня в пределах $\pm 2{,}5$ *мм* при высоте источника 150 *мм*.

Имеется много модификаций радиоактивных уровнемеров, как более простых, так и сложных.

Основное преимущество этих приборов: они не требуют установки каких-либо деталей внутри аппарата и могут применяться для аппаратов, работающих при высоком давлении, с толщиной стенок до 100 *мм*. Недостаток их — вредное воздействие гамма-излучения на организм человека, в связи с чем все эти приборы требуют строгого соблюдения правил безопасности при обращении с ними.

На рис. 5. 19 приведена схема радиоактивного конденсатоотводчика, применяемого для автоматического сброса конденсата из сборников*. Через люк внутри сборника устанавливают глухой стержень *3* с поплавком *2* и трубку *6*, внутренняя полость которой сообщена с атмосферой. Поплавок имеет форму опрокинутого двойного стакана, на его верхней поверхности укреплен источник гамма-излучения. Внутри трубки расположены два приемника *5* на высоте нижнего и верхнего заданного уровня. Приемники включены в электрическую схему управляющего блока, к выходу которой подключен показывающий прибор или сигнальное устройство. Кроме того, блок приводит в действие вентиль *10* с электроприводом; вентиль установлен на линии спуска конденсата. При понижении уровня поплавок опускается до положения нижнего приемника. Гамма-излучение приводит в действие управляющий блок, который дает сигнал о понижении уровня и одновременно перекрывает спускной вентиль. При повышении уровня действует приемник верхнего положения уровня и спускной вентиль перекрывается. Прибор работает при высоком давлении (до 150 *кГ/см*²) в сборнике, может быть применен и для других емкостей и аппаратов, из которых требуется периодически сбрасывать жидкость. Ввиду близости поплавка к приемнику мощность источника может быть очень малой, безвредной для здоровья человека, что является преимуществом описанного прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Количественный учет нефтепродуктов. Гостоптехиздат, 1958.
2. Вихман М. Е., Гойхман С. Я. Электрический дистанционный уровнемер УЭД-2. Контрольно-измерительные приборы для нефтяной и газовой промышленности. Тематический научно-технический сборник, серия «Нефтяное оборудование и средства автоматизации». ГОСИНТИ, 1961.
3. Петров А. И. и Дробах В. Т. Измерение давлений и расходов жидкостей и газа на нефтяных промыслах. Гостоптехиздат, 1959.
4. Нефтяное оборудование, т. VI. Контрольно-измерительные приборы. Гостоптехиздат, 1959.
5. Шумиловский Н. Н. и Мельтцер А. В. Применение ядерных излучений в устройствах автоматического контроля технологических процессов. Госэнергоиздат, 1958.
6. Дьяченко П. Е. Применение радиоактивных изотопов в технике. Машгиз, 1958.

---

* Разработан институтом ВНИИГаз.

ГЛАВА 6

ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

В связи с ростом автоматизации в последние годы появились новые автоматические приборы, определяющие состав и качество различных газообразных и жидких нефтепродуктов. Часть этих приборов ввиду их сложности применяется пока лишь в лабораториях. Но имеются приборы, определяющие состав и качество нефтепродуктов непосредственно на технологических установках. Эти приборы получили общее название «анализаторы качества или состава продуктов» и в ряде случаев могут быть использованы в регулирующих системах. Кроме того, анализаторы качества позволяют автоматизировать лабораторный контроль, ускорить получение результатов анализов и уменьшить число работников заводских лабораторий.

Приборы для определения состава и качества нефтепродуктов можно подразделить на: анализаторы состава газов и легкокипящих жидкостей — хроматографы, масс-спектрометры, инфракрасные анализаторы, электрические газоанализаторы для определения содержания в газовых смесях различных компонентов (CO_2, CO, O_2 и др.); анализаторы концентрации водородных ионов в водных растворах — pH-метры; анализаторы содержания примесей в нефти и нефтепродуктах — приборы для определения воды и солей; анализаторы физических свойств нефтей и нефтепродуктов — приборы для определения воды и солей; анализаторы физических свойств нефтей и нефтепродуктов — приборы для определения удельного веса, температуры вспышки, вязкости, упругости паров и т. д.

Количество методов и видов анализаторов качества непрерывно растет. Много приборов находится в разработке. Ниже приводится описание лишь тех приборов, которые получили применение в нефтеперерабатывающей промышленности в настоящее время.

Хроматографы, масс-спектрометры, инфракрасные анализаторы получили в настоящее время столь большое развитие, что их теория

и практика применения выделились в самостоятельные технические науки.

В данной главе приведены лишь основы теории, принципиальные схемы действия и устройства этих приборов.

§ 1. ХРОМАТОГРАФЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ГАЗОВ

Хроматографами называют приборы для анализа жидких и газовых смесей, основанные на хроматографических методах разделения.

Эти методы используют различную способность веществ адсорбироваться, а также растворяться по отношению к данному адсорбенту или растворителю.

Хроматографические методы являются физическими, при проведении которых ни один компонент смеси не теряется и не образуется каких-либо новых веществ.

В процессе хроматографического разделения компоненты распределяются между двумя фазами — подвижной и неподвижной. Подвижной фазой может быть газ или жидкость, неподвижной — слой жидкого или твердого сыпучего вещества с большой поверхностью. Подвижная фаза протекает (фильтруется) через слой неподвижной.

В зависимости от вида подвижной и неподвижной фаз различают следующие четыре вида хроматографии:

1) ж и д к о с т н о - а д с о р б ц и о н н а я, подвижная фаза — жидкость, неподвижная — твердое тело;

2) г а з о а д с о р б ц и о н н а я, подвижная фаза — газ, неподвижная — твердое тело;

3) ж и д к о с т н а я р а с п р е д е л и т е л ь н а я, подвижная фаза — жидкость, неподвижная — жидкость;

4) г а з о - ж и д к о с т н а я р а с п р е д е л и т е л ь н а я или просто газораспределительная, подвижная фаза — газ, неподвижная — жидкость.

Открытый впервые в 1903 г. русским ученым М. С. Цветом хроматографический метод разделения жидких смесей относится к жидкостно-адсорбционной хроматографии. В своих работах М. С. Цвет разделял смеси растворов растительных красящих веществ пропусканием их через трубку, заполненную твердым адсорбентом. Разделение компонентов определялось им по их окраске. В связи с этим этот метод получил название хроматографического метода (цветопись), которое прочно укоренилось в науке и технике и распространяется на все другие виды хроматографии бесцветных веществ.

В хроматографах для анализа газов используется газоадсорбционная и газораспределительная хроматография, причем второй вид получил наибольшее распространение. Общая схема хроматографа для анализа газов приведена на рис. 6. 1. Основными узлами хрома-

тографа являются: хроматографическая колонка *8*, устройство для фиксирования разделенных компонентов — детектор *7*, самопишущий прибор *5*, ротаметр *10* для измерения потока вещества подвижной фазы. Для получения подвижной фазы используется баллон *1* сжатого газа. В поток этого газа, который называется газомносителем, вводят анализируемую пробу. Колонку заполняют веществом неподвижной фазы.

В газоадсорбционных хроматографах неподвижной фазой является твердый адсорбент — уголь, силикагель и т. п., а в газораспределительных — слой жидкости на твердом сыпучем инертном

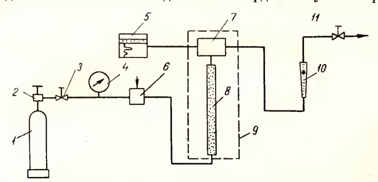


Рис. 6. 1. Схема хроматографа для анализа газов.

1 — баллон с газом-носителем; *2* — редуктор давления; *3* и *11* — регулировочные вентили; *4* — манометр; *5* — самопишущий прибор; *6* — устройство для ввода анализируемой пробы; *7* — детектор; *8* — колонка; *9* — термостат; *10* — ротаметр.

носителе. Диаметр трубки колонки может быть от 2 до 20 *мм*, а ее длина от 1 до 20 *м*. Колонку изготовляют из медной или стальной трубки, иногда из стеклянной в виде спирали или секций U-образной формы.

В газоадсорбционной хроматографии разделение компонентов происходит вследствие их различной способности адсорбироваться неподвижной твердой фазой, а в газораспределительной за счет неодинаковой их растворимости в жидкой неподвижной фазе. На рис. 6. 2 приведена схема, поясняющая процесс разделения смеси из двух компонентов при газоадсорбционной хроматографии. Однако эта же схема в полной мере относится и к газораспределительной хроматографии. На схеме изображены колонка и прохождение через нее в разных стадиях разделения двух компонентов *A* и *B* газовой смеси вместе с газом-носителем *E*. Колонка непрерывно продувается газом-носителем, слабо адсорбируемым неподвижной фазой. В некоторый момент вместе с газом-носителем в колонку вводится проба, состоящая из двух компонентов *A* и *B*, причем *B* адсорбируется сильнее, чем *A* (рис. 6. 2, *а*). Далее (рис. 6. 2, *б*, *в*, *г*, *д*) компонент *B* вследствие того, что он адсорбируется сильнее,

отделяется от компонента A. Наконец, наступает полное разделение и из колонки выносится газом-носителем сначала компонент A, а затем компонент B, отделенные друг от друга некоторым объемом газа-носителя E (рис. 6. 2, *е*). Для случая газораспределительной хроматографии компонент B имеет бóльшую способностью растворяться в неподвижной жидкой фазе, чем компонент A.

Практически разделение компонентов протекает не идеально, как это показано на рис. 6. 2. Концентрация отдельного компонента, выносимого из колонки газом-носителем, сначала увеличивается и достигает максимума, а затем постепенно уменьшается. Иногда между компонентами нет четкой грани их разделения.

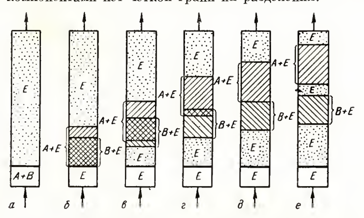


Рис. 6. 2. Схема процесса разделения газовой смеси из двух компонентов.

Описанный метод разделения с использованием газа-носителя, имеющего меньшую адсорбционную способность или меньшую растворимость, чем разделяемые компоненты, называется проявительным и газ-носитель иногда называют газом-проявителем.

При анализе сложной газовой смеси, состоящей из нескольких компонентов, например углеводородных газов, из колонки выносятся компоненты в порядке возрастания их молекулярных весов. Первыми выносятся легкие углеводороды, а затем более тяжелые.

В большей части современных газораспределительных хроматографов применяют детекторы, называемые дифференциальными; они основаны на измерении теплопроводности газов. Схема и устройство одного из таких детекторов приведены на рис. 6. 3. В массивном металлическом корпусе высверлены две ячейки, в которых расположены одинаковые платиновые спирали. Спирали включены в электрическую схему моста постоянного тока, образуя два его плеча. Напряжение небаланса измеряется электронным самопишущим прибором. Через одну ячейку, измерительную, непрерывно пропускается газ-но-

ситель, выходящий из хроматографической колонки, в котором может содержаться любой из компонентов анализируемой смеси. Через другую ячейку, сравнительную, непрерывно пропускается чистый газ-носитель. Детектор располагается в термостате; температура стенок детектора поддерживается постоянной.

Платиновые спирали, нагреваемые электрическим током, имеют температуру более высокую, чем температура окружающей среды. Тепло, выделяемое спиралями за счет теплопроводности газа, находящегося в ячейках, передается стенкам, от которых оно рассеивается

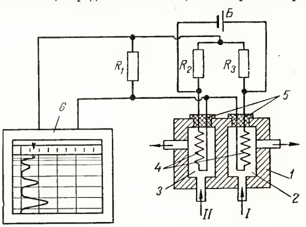


Рис. 6. 3. Схема детектора хроматографа, основанного на теплопроводности газов.

1 — металлический корпус; 2 — измерительная ячейка; 3 — сравнительная ячейка; 4 — платиновые спирали; 5 — изоляторы для ввода проводов; 6 — электронный мост; R_1, R_2 и R_3 — постоянные сопротивления; Б — батарея; I — смесь газа-носителя и компонентов из колонки; II — чистый газ-носитель.

в окружающую среду. При неизменных потоках газа в ячейках между спиралью и стенками корпуса детектора устанавливается тепловое равновесие.

Температура спиралей, а следовательно, и их электрическое сопротивление принимают при этом постоянные значения.

Если в ячейках находится один и тот же газ, то условия равновесия в них одинаковы и мост находится в равновесии. Когда же в измерительную ячейку газом-носителем вносится из колонки еще какой-либо газ с другой теплопроводностью, то тепловое равновесие нарушается. Если теплопроводность смеси становится меньше теплопроводности чистого газа-носителя, то передача тепла стенкам замедляется и спираль нагревается до более высокой температуры. Сопротивление спирали измерительной ячейки при этом увеличивается, что и приводит к нарушению равновесия моста. Чем больше количество того или иного компонента анализируемого газа вносится

газом-носителем в измерительную ячейку, тем в большей степени нарушаются тепловое равновесие и равновесие моста. Таким образом, по нарушению равновесия моста, фиксируемому самопишущим прибором, можно судить о наличии и о количестве в анализируемом газе отдельных компонентов, выносимых из колонки газом-носителем.

В качестве газа-носителя в газораспределительной хроматографии обычно применяют азот, водород и гелий. Желательно, чтобы теплопроводность газа-носителя по возможности больше отличалась от теплопроводности анализируемых газов. Величины теплопроводностей некоторых газов приведены в табл. 6. 1.

Таблица 6. 1

Теплопроводность газов λ
(10^{-3} *кал* · *см*$^{-1}$ *сек*$^{-1}$ · °C^{-1})

Газ	λ (при 0° C)	$\lambda/\lambda_{возд}$ (при 0° C)
Воздух	5,83	1,00
Кислород	5,94	1,02
Азот	5,81	0,996
Окись углерода	5,60	0,960
Водород	41,60	7,15
Углекислый газ	3,52	0,605
Гелий	34,80	5,97
Метан	7,21	1,25
Этан	4,30	0,738
Пропан	3,58	0,615
Бутан	3,22	0,552
Пентан	3,12	0,535
Гексан	2,26	0,508

Применение в качестве газа-носителя водорода и гелия вследствие их большой теплопроводности значительно повышает чувствительность детектора. Однако для технических измерений чаще применяют азот, так как стоимость его небольшая, а чувствительность достаточно высокая. Возможно использование в качестве газа-носителя осушенного и очищенного от пыли воздуха.

Вид записи результатов анализа, или хроматограмма смеси углеводородных газов, газораспределительным способом с дифференциальным детектором приведен на рис. 6. 4. По оси ординат отложено напряжение небаланса моста по оси абсцисс — время t. Поскольку колонка имеет одинаковый диаметр по всей длине и заполнена веществом неподвижной фазы равномерно, по оси абсцисс можно отсчитывать величину объема газа-носителя, прошедшего через колонку за время t при условии, что его скорость постоянна.

В момент времени A в колонку ввели пробу газа. В момент B зафиксирован пик не задерживаемого в колонке компонента (например, воздуха). Затем через некоторое время появился первый пик, потом второй и т. д.

Запись в виде отдельных пиков объясняется тем, что вследствие не идеально четкого разделения компоненты поступают (и удаляются) в измерительную ячейку детектора вместе с газом-носителем постепенно. Количество протекающего через ячейку компонента сначала увеличивается, достигает максимума, а затем постепенно умень-

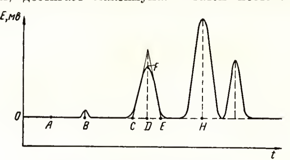


Рис. 6. 4. Вид хроматограммы.

шается. Отсюда следует, что количество отдельного компонента в анализируемом газе может характеризоваться площадью записанного пика. Как видно, каждый последующий компонент, который задерживается неподвижной фазой, перемещается по колонке медленнее и выходит позже. Отрезок времени BD называется временем удерживания, а соответствующий ему объем газа — удерживаемым объемом. Для второго компонента эта величина характеризуется отрезком BH и т. д.

Время удерживания для каждого компонента газовой смеси при одинаковых условиях опыта есть величина постоянная. Это позволяет по времени, через которое появляются пики, судить о природе компонентов, т. е. определять, какой именно газ (метан, этан, пропан и т. д.) соответствует тому или иному пику. Если в хроматограмме нет пика с временем удерживания, характерным для определенного газа, то, следовательно, этого газа нет в анализируемой смеси. Время удерживания определяют экспериментально для данного вида газовой смеси, неподвижной фазы, скорости, температуры и давления газа-носителя, а также длины колонки. Если принять суммарную площадь пиков всех компонентов за 100%, то отношение площади пика любого одного компонента к общей дает процентное содержание его в смеси. За ширину пика принимают отрезок CE, образованный двумя касательными к точке перегиба боковых кривых пика. Высота пика равна отрезку DF.

Качество хроматографических приборов определяется по их способности в большей или меньшей степени разделять между собой все компоненты анализируемой смеси. Разделительная способность их сильно зависит от свойства вещества неподвижной фазы. Поэтому в зависимости от предполагаемого состава смеси применяют ту или иную жидкость, нанесенную на твердый носитель, или соответствующий адсорбент. На разделение влияют еще длина колонки, температура, скорость газа-носителя и величина анализируемой пробы. Некоторые компоненты, близкие по своим свойствам, разделяются трудно (например, этан и этилен). Часто хроматограммы имеют не полностью разделенные пики со слившимися основаниями. Тем не менее хроматографические приборы, получившие свое развитие в последнее десятилетие, наиболее пригодны для анализа сложных газовых смесей, таких, как углеводородные газы крекинга и др. До появления хроматографических приборов углеводородные газы анализировались методом низкотемпературной разгонки, на что затрачивалось много времени и к тому же смеси разделялись не полностью. На хроматографе с большой точностью можно разделить смесь углеводородных газов с содержанием до 18 компонентов в течение около одного часа.

Объем пробы газовой смеси, требуемый для хроматографического анализа, очень небольшой и составляет 1—10 *мл*.

Хроматографы пригодны и для анализа летучих жидкостей с температурой кипения до 400° С. Жидкость переводится в парообразное состояние путем нагрева пробы и поддержания достаточно высокой температуры колонки.

На рис. 6. 5 приведена схема лабораторного хроматографа * для анализа газов и жидкостей с температурой кипения до 180° С. Спиральная колонка и детектор находятся в термостате. Последний снабжен подогревателем и вентилятором для равномерного распределения тепла по высоте колонки. Электрический ток к подогревателю подводится через реле электронного регулятора температуры, чувствительным элементом которого служит термометр сопротивления, расположенный внутри термостата (на схеме не показан). Регулятор температуры расположен в блоке управления. В верхней части колонки имеется еще один термометр сопротивления, которым измеряют температуру колонки, подключенный к самопишущему прибору через переключатель (на схеме не показан). В детекторе вместо платиновых спиралей применены термочувствительные сопротивления — термисторы. Схема содержит кран переключения и подогреватель жидкой пробы.

Перед началом анализа кран переключения занимает положение *I*, при котором газом-носителем продуваются колонка и обе ячейки детектора. Продувка ведется до тех пор, пока колонка и детектор

* Разработан СКБ АНН.

не прогреются до установленной в термостате температуры, что контролируется по постоянству нулевой линии на самопишущем приборе. Незадолго до начала анализа подводят испытуемый газ к сменной дозировочной трубке, подключенной к крану, и некоторое время продувают ее для удаления воздуха. Затем поворотом крана в положение *II* трубку включают в поток газа-носителя, проба вносится

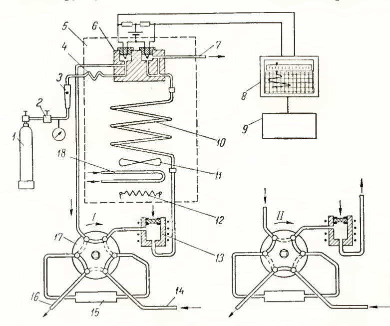


Рис. 6. 5. Схема лабораторного хроматографа.

1 — баллон с газом-носителем; *2* — редуктор давления; *3* — ротаметр; *4* — змеевик для подогрева газа-носителя; *5* — термостат; *6* — детектор; *7* — линия выхода газа; *8* — самопишущий прибор; *9* — блок управлеяия; *10* — колонка; *11* — вентилятор; *12* — подогреватель колонки; *13* — подогреватель жидкой пробы; *14* — линия ввода пробы; *15* — дозировочная трубка; *16* — линия выхода пробы газа; *17* — кран переключения; *18* — змеевик для охлаждающей воды; *I* — положение крана при продувке; *II* — положение крана при анализе.

в колонку и начинается анализ. Окончание анализа определяется по хроматограмме самопишущего прибора.

При анализе жидкой пробы кран переключения все время находится в положении *I*. Отмеренное количество жидкости от 0,01 до 0,08 *мл* вводят шприцем (типа медицинского) через резиновую пробку в подогреватель жидкой пробы. В подогревателе проба быстро испаряется, и пары вместе с газом-носителем поступают в колонку.

Температура в термостате может быть от комнатной до 120° С, т. е. необходимая в данном интервале для анализа жидких проб. Для поддержания температуры ниже окружающей используется

змеевик с охлаждающей водой, при этом подогреватель и регулятор температуры выключаются.

В качестве газа-носителя могут быть использованы азот, водород и гелий. Вещество неподвижной фазы, заполняющей колонку, выбирается в зависимости от требования анализа. В частности, это может быть порошок из огнеупорного кирпича с частицами определенных размеров, смешанный с небольшим количеством (около 8% от веса порошка) вазелинового масла.

Самопишущий прибор — электронный мост — имеет электрическую схему, позволяющую при помощи переключателя измерять температуру в термостате, силу тока питающего мост детектора и проверять нуль регистратора. Кроме того, самопишущий прибор записывает хроматограмму в процессе всего анализа. Шкала прибора имеет пять диапазонов, позволяющих изменять чувствительность в достаточно широких пределах (16 : 1). Расход газа-носителя (2—8 *л/ч*) контролируется по ротаметру и регулируется вручную редуктором давления и вентилем.

Существуют автоматические хроматографы для контроля состава газов в потоке. Принципиально они не отличаются от описанного лабораторного хроматографа, но их действие автоматизировано дополнительными устройствами. К автоматическому хроматографу подводится трубка с анализируемым газом. Кран переключения действует автоматически от электродвигателя, управляемого таймером. После каждого цикла анализа автоматически проверяется и устанавливается нулевая точка самопишущего прибора путем регулировки тока питания моста детектора. Продолжительность цикла анализа можно изменять в зависимости от состава газа от 7 до 45 *мин*. Самопишущий прибор записывает хроматограммы каждого цикла.

Блок с колонкой, детектором и термостатом автоматического хроматографа изготовляют во взрывобезопасном исполнении и устанавливают непосредственно на технологической установке вблизи от точки отбора пробы. Самопишущий прибор и блок управления с электрическими устройствами устанавливают во взрывобезопасном помещении на расстоянии до 150 *м*.

Очень важно для автоматического хроматографа правильно выполнить схему отбора газа, поступающего на анализ из технологического трубопровода. Необходимо, чтобы по трубке от точки отбора до хроматографа газ непрерывно циркулировал. Это уменьшает запаздывание в показаниях по отношению к моменту прохождения потока газа мимо точки отбора. Давление газа должно быть снижено и газ очищен от механических примесей и влаги. Для этого в комплект автоматического хроматографа добавляется блок подготовки газа.

Общая схема автоматического хроматографа приведена на рис. 6. 6. Между двумя точками технологического потока с разными давлениями прокладывается трубка, по которой циркулирует газ. Петля

трубки подводится к месту установки блока подготовки газа, и от нее сделан отвод к этому блоку. Давление газа снижается двумя редукторами до 1,2—1,5 *кГ/см²* и поддерживается строго постоянным. Между редукторами сделан отвод, по которому часть газа через вентиль сбрасывается в атмосферу. Этим достигается более стабильная работа редукторов. Давление газа контролируется по манометрам. Далее газ проходит через фильтр-осушитель, ротаметр и поступает к крану-переключателю блока колонки хроматографа.

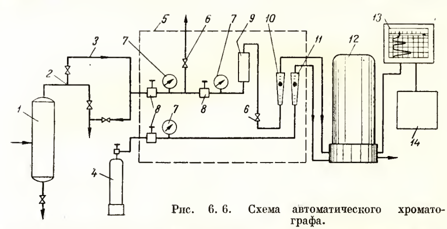


Рис. 6. 6. Схема автоматического хроматографа.

1 — технологический аппарат; *2* — место отбора пробы; *3* — трубка с циркулирующим газом; *4* — баллон с газом-носителем; *5* — блок подготовки газа; *6* — вентили; *7* — манометры; *8* — редукторы давления; *9* — фильтр для осушки газа; *10* — ротаметр анализируемого газа; *11* — ротаметр газа-носителя; *12* — блок колонки; *13* — самопишущий прибор; *14* — блок управления.

Газ-носитель из баллона также проходит через редуктор (устройство редуктора описано в главе 8) для поддержания постоянного давления и далее через ротаметр подается в блок колонки. Схема блока колонки и детектора ничем не отличается от схемы их в лабораторном хроматографе.

Газоадсорбционные хроматографы получили сравнительно небольшое развитие. Их применяют главным образом для анализа смесей таких газов, как, например, гелий, окись углерода, метан и воздух. В качестве адсорбентов применяют активированный уголь, силикагель, окись алюминия и др. Обычно используется проявительный метод.

На рис. 6. 7 приведена схема простого газоадсорбционного хроматографа. При помощи напорного сосуда заполняется анализируемым газом сосуд калиброванного объема (около 100 *мл*). Затем газ пропускают через хроматографические колонки. Неадсорбированные компоненты собираются в верхней части измерительной бюретки, и их объем определяют по понижению уровня раствора KOH. После

этого колонку продувают углекислым газом (CO_2), используемым в качестве газа-носителя. Из колонок через некоторое время будут выходить разделенные компоненты в смеси с CO_2. Пройдя через ртутный затвор бюретки, смесь попадает в раствор KOH, заполняющий измерительную бюретку. Углекислый газ полностью поглощается, а газовый компонент поднимается в верхнюю часть бюретки и увеличивает объем, занятый газом. По понижению уровня KOH в бюретке можно проследить за поступлением компонентов и определить их

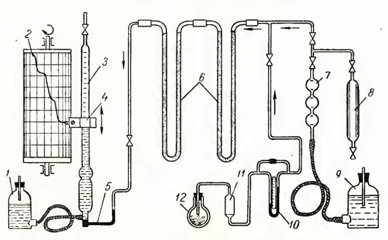


Рис. 6. 7. Схема газоадсорбционного хроматографа.

1 — сосуд с раствором KOH; *2* — барабан для записи хроматограмм; *3* — измерительная бюретка; *4* — картека следящей системы; *5* — ртутный затвор; *6* — колонка с адсорбентом, *7* — сосуд калиброванного объема; *8* — сосуд с пробой газа; *9* — напорный сосуд с водой; *10* — измеритель расхода газа-носителя; *11* — осушитель CO_2; *12* — сосуд с твердым CO_2.

количество. Иногда бюретку снабжают фотоэлектрическим следящим устройством, каретка которого перемещается вместе с изменением уровня. К каретке прикрепляется перо с чернилами, которое записывает кривую на вращающемся барабане с бумажной лентой.

Измерительная бюретка выполняет работу детектора, который называют объемным или интегральным. Такой детектор может быть осуществлен лишь при условии, что газ-носитель поглощается раствором KOH. Хроматограмма имеет вид ступенчатой кривой. Каждая ступень соответствует отдельному компоненту анализируемой смеси. Количество каждого компонента определяется по накопленному объему газа в бюретке.

Газоадсорбционные хроматографы могут иметь также детекторы по теплопроводности с применением газа-носителя — азота, гелия или водорода.

В СССР разработаны и выпускаются так называемые хроматермографы*, представляющие собой по существу газоадсорбционные хроматографы, у которых в процессе работы колонка подвергается нагреванию по заданной программе. Изменение температуры колонки с адсорбентом до некоторой степени ускоряет процесс разделения, приводит к более четкому разделению и позволяет при одном и том же адсорбенте разделять сложные смеси. Однако хроматермографы сложнее по конструкции и менее распространены, чем хроматографы.

Развитие хроматографии направлено в сторону создания приборов с более высокой чувствительностью, большей разделительной способностью и ускоряющих процессов разделения сложных смесей. Создаются хроматографы для анализов все более и более тяжелых жидкостей, которые предварительно испаряются. Кроме описанного выше, существуют еще другие, более чувствительные виды детекторов — ионизационные, пламенные и др. В последнее время разработаны газораспределительные хроматографы с капиллярной колонкой, изготовленной из тонкой трубки диаметром около 1,5 *мм* и в несколько метров длиной. Неподвижной фазой в капиллярных колонках является слой нелетучей жидкости, нанесенной на стенках трубки. Капиллярные хроматографы быстро разделяют сложные смеси.

Ведутся работы по созданию хроматографов для регулирования технологических процессов.

§ 2. МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ АНАЛИЗА ГАЗОВ

Масс-спектрометр основан на физическом принципе, состоящем в разделении анализируемого газа по массам составляющих его компонентов. Имея чрезвычайно высокую чувствительность и разделительную способность, масс-спектрометры пригодны для определения изотопов отдельных химических элементов и анализа многокомпонентных смесей различных веществ. В нефтяной промышленности масс-спектрометры применяются как анализаторы состава углеводородных газов и низкокипящих жидкостей.

Масс-спектрометр — сложное и дорогостоящее устройство, включающее систему, работающую под высоким вакуумом, и ряд электрических и электронных блоков.

Блок-схема масс-спектрометра приведена на рис. 6. 8. Основной деталью является анализатор *5* из изогнутой трубки из немагнитного металла, обычно медной, диаметром 40—50 *мм*. Анализатор расположен в поле постоянного магнита, причем часть трубки, проходящей между полюсными наконечниками *2* (на рисунке показан один), сплюснута почти до прямоугольного сечения. К одному концу

* Разработаны ВНИИКАНефтегазом совместно с ВНИИГНИ.

анализатора прикреплена ионизационная камера *7*, а к другому — коллектор ионов *21*. В анализаторе, включая ионизационную камеру и коллектор, при помощи диффузионных и форвакуумных насосов поддерживается глубокий вакуум порядка 10^{-6}—10^{-7} *мм рт. ст.*

Анализируемый газ из сосуда *13* для пробы перепускается в напускной баллон *11*, давление в котором выше, чем в анализаторе (около 0,1—0,7 *мм рт. ст.*). Из напускного баллона газ через отверстие *10* очень малого диаметра (15—20 *мк*) под действием раз-

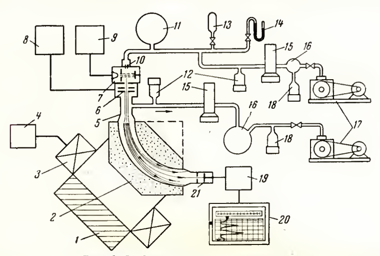


Рис. 6. 8. Схема масс-спектрометра.

1 — сердечник электромагнита; *2* — полюсный наконечник; *3* — обмотка электромагнита; *4* — блок питания электромагнита; *5* — анализатор; *6* — ускоряющие пластины; *7* — ионизационная камера; *8* — блок питания ускоряющего поля; *9* — блок питания катода; *10* — отверстие для ввода пробы; *11* — напускной баллон; *12* — ионизационный манометр; *13* — сосуд с пробой газа; *14* — вакуумметр ртутный; *15* — ртутный диффузионный насос; *16* — форвакуумный баллон; *17* — форвакуумный насос; *18* — термопарный манометр; *19* — усилитель ионных токов; *20* — самопишущий прибор; *21* — коллектор ионов.

ности давлений поступает в ионизационную камеру, в которой он ионизируется пучком электронов, летящих от раскаленного катода к аноду.

Ионизированные молекулы и их осколки, которые образуются при бомбардировке электронами, приобретшие электрический заряд, вытягиваются электрическим полем из зоны ионизации и получают ускорение от действия сильного электрического поля, созданного ускоряющим напряжением, приложенным к пластинам *6*. По выходе из щели последней ускоряющей пластины параллельный пучок ионов вылетает в анализатор. Как только ионный пучок попадает в зону магнитного поля, его траектория изменяется на криволинейную, и одновременно начинается разделение пучка на лучи соответственно величинам масс ионов. При выходе из изогнутой части анализатора

ионный пучок разделен веерообразно на отдельные лучи однородных по массе ионов. На коллектор через щель может сфокусироваться только один ионный луч. Все остальные лучи попадают на заземленную поверхность металлической трубки и нейтрализуются. Веерообразный поток отдельных лучей из однородных по массе ионов и есть спектр масс.

Коллектор, представляющий собой пластину с изолированным от корпуса анализатора электрическим выводом, заземлен через высокоомное сопротивление. Ионный луч, падающий на коллектор, отдает последнему свой электрический заряд, и по сопротивлению проходит ток, называемый ионным. Величина этого ионного тока, пропорциональная интенсивности ионного луча, является мерой, которая позволяет оценивать содержание частиц данной массы в исходной смеси газа. Измеряется ионный ток специальными электронными устройствами — усилителями постоянного тока с высокоомным входом и записывается на диаграмме самопишущего прибора.

Остатки газа и осколков молекул, не подвергшихся ионизации, удаляются из ионизатора при помощи системы откачки с диффузионным и форвакуумным насосами.

Чтобы получить возможность измерить ионный ток не одного какого-либо луча ионов, а всех образующих спектр масс, в определенной закономерности по времени изменяют напряженность магнитного поля. Постепенное увеличение напряженности магнитного поля от минимального до максимального значения приводит к тому, что мимо щели в коллекторе проходят последовательно все лучи спектра, начиная от малых до самых больших масс. В результате на диаграмме самопишущего прибора записывается ряд пик спектрограммы или спектр масс данного вещества. Каждый пик характеризует содержание той или иной массы в анализируемой смеси.

Величина массы молекул, состоящих из одного атома, равна (с некоторым приближением) их атомному весу и сложных молекул — их молекулярному весу. Так, например, масса одной молекулы углерода, состоящей из одного атома, равна его атомному весу 12; масса молекулы этана, состоящей из двух атомов углерода и шести атомов водорода C_2H_6, равна 30 и т. д. За единицу химической шкалы атомных масс выбрана $^1/_{16}$ массы естественной смеси изотопов кислорода.

Зависимость между массой иона, напряжением магнитного поля, траекторией иона и ускоряющим напряжением выражается основным уравнением масс-спектрометрии

$$\frac{M}{e} = KR^2 \frac{H^2}{U}, \tag{6.1}$$

где M — масса иона в атомных единицах;
e — число элементарных зарядов иона;
R — радиус траектории ионного луча в *см*;
H — напряженность магнитного поля в *гс*;

U — ускоряющее напряжение в *в*;

K — постоянная, равная $4{,}82 \cdot 10^{-5}$.

Из уравнения (6. 1) следует

$$R = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{UM}{Ke}}. \qquad (6.2)$$

Отсюда видно, что изменения радиуса траектории ионного луча можно достичь изменением напряженности магнитного поля или ускоряющего напряжения. В практике чаще прибегают к изменению напряженности магнитного поля.

Каждое вещество при одних и тех же условиях опыта дает воспроизводимый масс-спектр, в связи с чем имеется возможность использовать масс-спектрометр для анализа смесей веществ. В табл. 6.2 приведены в качестве примера масс-спектры трех углеводородов, причем масса молекулярного иона (высота его пика) принята за 100%.

Таблица 6.2

Масс-спектры индивидуальных углеводородов

$\frac{M}{e}$	Метан	Этан	Пропан
12	0,5	—	—
14	16,1	—	—
15	80,0	18,1	22,0
16	100	0,2	0,2
26	—	72,4	22,1
27	—	108,0	108,2
28	—	371,0	190,0
29	—	79,1	230,0
30	—	100	5,9
31	—	2,8	—
37	—	—	7,1
38	—	—	13,9
39	—	—	49,1
40	—	—	7,5
41	—	—	42,1
42	—	—	18,3
43	—	—	80,0
44	—	—	100
45	—	—	3,3

Масс-спектр отдельных углеводородов состоит из ряда отдельных масс, которые по своей величине могут быть как меньше, так и больше массы молекулярного иона. Чем тяжелее углеводород, тем больше число отдельных масс в его масс-спектре. Это в сильной степени усложняет задачу расшифровки спектрограммы смеси углеводородных газов. Однако разработанные методики позволяют рас-

шифровать масс-спектры сложных газовых смесей и тем самым делают возможным их анализ при помощи масс-спектрометра.

Спектрограмма, полученная на самопишущем приборе, по своему внешнему виду похожа на хроматограмму (см. рис. 6. 4). Количество отдельной массы определяется из отношения площади ее пика к суммарной площади всех пик масс-спектра. Масс-спектрометром можно определить ничтожное (до 0,001%) содержание какого-либо компонента в смеси. Величина пробы газа при анализе также весьма небольшая. Длительность анализа газовой смеси при наличии масс от 12 до 120 около 2 *ч*.

§ 3. ИНФРАКРАСНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СОСТАВА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Инфракрасные анализаторы основаны на свойстве газов и жидкостей поглощать волны определенной длины из области инфракрасного излучения.

Инфракрасные лучи испускаются нагретыми телами и занимают в электромагнитном спектре излучения область с длинами волн от 0,76 до 750 *мк* (рис. 6. 9); 1 *мк* = 10^{-6} *м*. Лучи эти невидимы, лежат

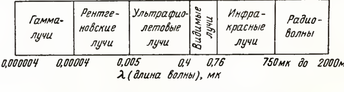


Рис. 6. 9. Спектр электромагнитных излучений.

за красным цветом видимой области спектра, но подчиняются законам распространения и преломления для видимых лучей.

Инфракрасные лучи длиной от 0,76 до 2,5 *мк* излучаются внешними электронами атомов при переходе их с более высокого энергетического уровня на более низкий. Лучи длиной от 2,5 до 25 *мк* излучаются молекулами вследствие их колебательного движения, а более длинной волны от вращательного движения молекул.

В инфракрасных анализаторах обычно используется лишь часть области инфракрасного излучения с длинами волн примерно от 2,0 до 25 *мк*. Для удобства вместо длины волны указывают величину так называемого волнового числа, равного числу длин волн, укладывающихся в одном сантиметре. Размерность волнового числа $см^{-1}$. Для волн длиной 2,0—25 *мк* волновые числа равны соответственно 5000 и 400 $см^{-1}$.

В качестве источника инфракрасного излучения применяют стержни из спрессованного карбида кремния и из некоторых других

материалов, а также спирали из нихромовой проволоки. Стержни и спирали нагревают током до температуры красного каления (600—1400° С).

Способность поглощать инфракрасные лучи имеют только жидкости и газы, молекулы которых состоят не менее чем из двух разных элементов. Такие вещества, как водород, азот, кислород и инертные газы, не поглощают инфракрасных лучей и не могут быть определены методом инфракрасной спектрометрии.

Каждый углеводородный газ имеет определенное молекулярное строение и характерную для него частоту колебаний молекул. При прохождении через слой газа инфракрасных лучей те из них, которые

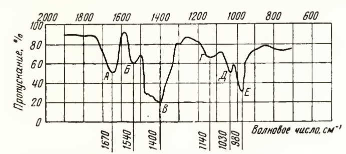


Рис. 6. 10. Инфракрасный спектр поглощения бутилена-2.

имеют частоту колебаний, равную частоте колебаний молекул, поглощаются. Энергия поглощенных лучей расходуется на увеличение энергии движения молекул. Лучи же с отличной частотой проходят через газ без изменений.

Каждый газ поглощает обычно несколько полос лучей определенных длин волн. Если через один и тот же газ пропускать последовательно всю полосу излучения и измерять интенсивность лучей, прошедших через слой газа, то можно построить график, который называют инфракрасным спектром поглощения данного газа.

На рис. 6. 10 приведен в качестве примера инфракрасный спектр поглощения бутилена-2. Степень поглощения характеризуется пропусканием, или прозрачностью, выраженным в процентах. Как видно, спектр имеет несколько полос поглощения. Максимумы в точках *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д* и *Е* этих полос поглощения соответствуют частотам собственных колебаний молекул газа.

Каждый углеводородный газ имеет свой характерный инфракрасный спектр поглощения. Это и является основой инфракрасной спектрометрии, позволяющей определять качество газа в смеси и количественные соотношения отдельных компонентов.

Инфракрасная спектрометрия получила очень большое распространение при изучении свойств и строения всевозможных органи-

ческих соединений и в особенности при исследованиях высокомолекулярных соединений синтетических материалов.

При качественных анализах сравниваются известные спектры чистых соединений с полученным спектром анализируемого продукта. Количественные определения характеризуются интенсивностью полос поглощения на основании закона Ламберта — Беера по уравнению

$$c = \frac{1}{K_\lambda l} \log \frac{J_0}{J}, \qquad (6.3)$$

где c — концентрация данного вещества в образце;
K_λ — коэффициент поглощения данного вещества при длине волны λ;
l — толщина слоя образца (длина кюветы);
J_0 — спектральная интенсивность радиации до образца;
J — спектральная интенсивность радиации после образца.

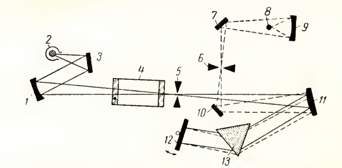


Рис. 6. 11. Оптическая схема лабораторного инфракрасного анализатора.

1 и 9 — сферическое зеркало; 2 — источник излучения; 3, 7 и 10 — плоские зеркала; 4 — кювета с пробой газа; 5 — входная щель; 6 — выходная щель; 8 — термопара; 11 — параболическое зеркало; 12 — плоское зеркало Литтрова; 13 — призма.

На рис. 6. 11 приведена оптическая схема лабораторного инфракрасного спектрометра. Общий поток инфракрасных лучей, излучаемых источником, фокусируется сферическим зеркалом на входную щель пройдя при этом через кювету с пробой газа. Далее лучи, отразившись от параболического зеркала, проходят через призму, которая разлагает их в спектр. Пройдя призму, лучи отражаются от зеркала Литтрова, снова проходят через призму и в конце концов фокусируются на термопару. Зеркало Литтрова при помощи электродвигателя и системы передачи медленно поворачивается, и этим достигается последовательное фокусирование волн различной длины (от 2 до 25 *мк*) на термопару, т. е. развертка спектра.

Термопара служит для измерения интенсивности падающих на нее лучей. Э. д. с. термопары усиливается электронным усилителем и записывается самопишущим потенциометром (на рисунке не пока-

заны). По углу поворота зеркала Литтрова судят о длине волны, проходящей в данный момент через выходную щель.

Длина кюветы для газа 15 *см*, для жидкостей кювета небольшая, и расстояние между ее окнами составляет доли миллиметра. Окна кювет и призмы делают из материалов, хорошо пропускающих инфракрасные лучи. Так как материала, одинаково хорошо пропускающего все лучи, нет, то применяют окна и призмы из разных материалов для разных диапазонов длин волн. Так, для диапазона от 2,5 до 6 *мк* используется кристалл фтористого лития, от 6 до 16 *мк* — хлористого натрия и от 18 до 25 *мк* — бромистого калия. Промышленные инфракрасные автоматические анализаторы для непрерывного контроля состава газов отличаются от лабораторных. Каждый из них предназначен для определения какого-либо одного компонента в смеси, например изобутана в нормальном бутане, ацетилена в кислороде и этилене, углекислого газа в воздухе, окиси углерода в воздухе, метана в воздухе и т. п. В промышленных анализаторах не применяют развертки спектра, а используют разность интенсивностей интегральной радиации до и после прохождения лучей через образец. В качестве чувствительного элемента, измеряющего интенсивность радиации в промышленных анализаторах, вместо термопары используют так называемое оптико-акустическое устройство, действие которого основано на изменении давления в замкнутом объеме газа при его облучении прерывистым потоком инфракрасных лучей. Эти изменения преобразовываются конденсаторным микрофоном в звуковые колебания, по которым можно судить об интенсивности инфракрасных лучей.

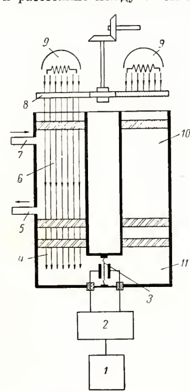


Рис. 6. 12. Схема промышленного инфракрасного анализатора.

1 — регистратор; *2* — электронный усилитель; *3* — мембрана; *4* и *11* — измерительные камеры; *5* — линия выхода газа; *6* — кювета с испытуемым газом; *7* — линия входа газа; *8* — прерыватель облучения (обтюратор); *9* — источники излучения; *10* — сравнительная кювета.

Существует большое число разновидностей промышленных автоматических инфракрасных анализаторов. Упрощенная схема, поясняющая их основной принцип действия, представлена на рис. 6. 12.

Два одинаковых потока инфракрасных лучей, прерываемых обтюратором (вращающаяся заслонка) с частотой около 6 *гц*, попадают один в кювету с испытуемым газом, а второй в сравнительную кювету; последняя заполнена осушенным воздухом. Пройдя кюветы, потоки попадают соответственно в левую и правую измерительные камеры. Эти камеры разделены тонкой металлической мембраной, выполняющей работу одной из обкладок конденсатора. Измерительные камеры заполнены газом, состоящим из смеси анализируемого компонента определенной концентрации с воздухом.

Поток инфракрасных лучей, проникающих через кювету с анализируемым газом, ослабляется за счет частичного его поглощения, причем степень этого ослабления зависит от концентрации газа. Поток же, проходящий через сравнительную камеру, не изменяется. В измерительных камерах под действием прерывистого потока инфракрасных лучей вследствие нагревания газа возникают колебания давления с частотой прерывания потока излучения. В правой измерительной камере амплитуда колебания давления постоянная, а в левой зависит от интенсивности потока лучей. Последняя же, как было сказано, изменяется с концентрацией анализируемого компонента в образце газа. Колебания давления газа в измерительных камерах воспринимаются мембраной конденсаторного микрофона и преобразовываются в электрические. Затем эти электрические колебания усиливаются в электронном усилителе и преобразовываются в постоянный ток, измеряемый регистратором. Величина этого тока пропорциональна концентрации анализируемого компонента. Анализируемый газ протекает через кювету непрерывно и поступает из технологического потока. В пробоотборной системе (на рис. 6.12 не показана) газ очищается от пыли и влаги и снижается его давление. В нефтепереработке для контроля промышленных процессов автоматические инфракрасные анализаторы пока еще не получили большого распространения. Они применяются в основном в химических и нефтехимических производствах для непрерывного контроля содержания определенных отдельных компонентов в газовых смесях.

§ 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ СОСТАВА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Для определения содержания CO_2 и $CO + H_2$ в дымовых газах печей для подогрева нефтепродуктов, так же как и в топках паровых котлов, применяют электрические газоанализаторы, основанные на физических методах.

Для определения CO_2 используется его отличие по теплопроводности от воздуха (см. табл. 6. 1). Очищенный от механических примесей и конденсата газ из дымохода печи подается в металлическую газовую камеру, в которой расположены две платиновые нити, нагреваемые электрическим током (рис. 6. 13, *а*).

Через газовую камеру непрерывно протекает газ. Другие две такие же платиновые нити расположены в камере, заполненной неподвижным воздухом. Обе камеры заключены в один кожух и находятся при одинаковой окружающей температуре. Нити включены в схему моста (рис. 6. 13, *б*) и нагреваются постоянным током до температуры около 100° С.

Так же как и в описанном выше детекторе по теплопроводности хроматографа, между нагретыми платиновыми нитями и стенками камер происходит теплообмен. Тепло стенкам передается в основном

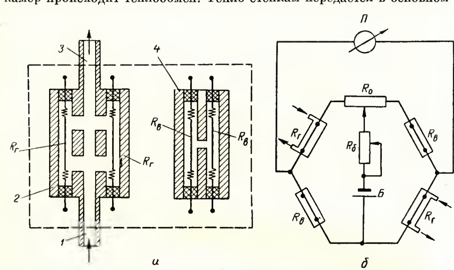


Рис. 6. 13. Схема датчика газоанализатора на CO_2.

а — камера датчика; *б* — электрическая схема; *1* — линия ввода газа; *2* — газовая камера; *3* — линия выхода газа; *4* — воздушная камера; *П* — измерительный прибор; $R_г$ и $R_в$ — платиновые нити; R_0 — регулятор нуля; $R_б$ — реостат батареи; *Б* — батарея.

за счет теплопроводности воздуха и газа, окружающего нити. Если через газовую камеру пропустить воздух, то тепловое состояние всех четырех нитей будет одинаково и мост находится в равновесии. Когда же через газовую камеру протекают дымовые газы, содержащие CO_2, теплопроводность которого почти на 40% меньше, чем у воздуха, температура нитей $R_г$ повышается и их сопротивление увеличивается, равновесие моста нарушается. При этом указатель измерительного прибора отклоняется от нулевого деления и показывает процентное содержание CO_2.

Для устранения влияния водорода (почти всегда присутствует в дымовых газах), теплопроводность которого значительно больше, чем у CO_2 и воздуха, дымовые газы перед тем, как они попадут в газовую камеру, пропускают через печь дожигания. Печь дожигания

состоит из фарфоровой трубки с платиновым катализатором и нагревающей обмотки из нихромовой проволоки, по которой пропускают электрический ток. Содержащийся в дымовых газах водород сгорает при сравнительно низкой температуре благодаря применению платинового катализатора и тем самым удаляется из пробы, поступающей на анализ.

Схема установки газоанализатора на CO_2 приведена на рис. 6.14. Газы пропускаются через систему газоанализатора водоструйным насосом. Расстояние между точкой отбора пробы и датчиком должно быть минимальным в целях уменьшения запаздывания.

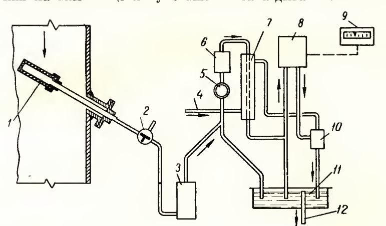


Рис. 6. 14. Схема установки газоанализатора на CO_2.

1 — керамический фильтр; *2* — трехходовой кран; *3* — фильтр для очистки газа от SO_2; *4* — линия входа воды; *5* — ватный контрольный фильтр; *6* — печь дожигания; *7* — холодильник; *8* — датчик CO_2; *9* — измерительный прибор; *10* — водоструйный насос; *11* — сосуд; *12* — линия спуска в канализацию.

На описанном выше принципе, который называют кондуктометрическим, и по подобным схемам работают газоанализаторы для определения в газовых смесях водорода, аммиака, сернистого ангидрида и некоторых других газов.

Для определения содержания продуктов неполного сгорания $CO + H_2$ в дымовых газах применяют газоанализаторы, основанные на измерении повышающегося сопротивления платиновой нити при каталитическом сжигании газа на ее поверхности. Схема устройства датчика и электрическая схема газоанализатора $CO + H_2$ приведены на рис. 6. 15.

В анализируемый газ при поступлении в газовую камеру через ватный фильтр добавляется воздух. Платиновая нить газовой камеры нагревается электрическим током до температуры около 400° C и на ее поверхности происходит каталитическое сгорание $CO + H_2$. Температура нити повышается в зависимости от количества $CO + H_2$.

Вызванное этим повышение сопротивления нити измеряется схемой моста постоянного тока.

Обычно датчики $CO + H_2$ устанавливают последовательно с датчиком CO_2. В этом случае печь дожигания в комплекте отсутствует.

В качестве измерительных приборов в электрических газоанализаторах применяют милливольтметры показывающие и иногда самопишущие. Прибор на CO_2 имеет шкалу 0—20%, а прибор на $CO +$

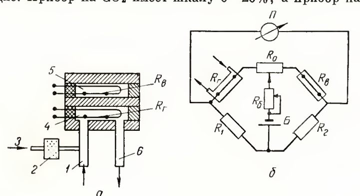


Рис. 6. 15. Схема газоанализатора на $CO + H_2$.

а — камеры датчика; *б* — электрическая схема, *1* — линия ввода газа; *2* — ватный фильтр; *3* — линия ввода воздуха; *4* — газовая камера; *5* — воздушная камера; *6* — линия выхода газа; *П* — измерительный прибор; $R_г$ и $R_в$ — платиновые нити; R_1 и R_2 — постоянные сопротивления; $R_б$ — реостат батареи; R_0 — регулятор нуля; *Б* — батарея.

$+ H_2$ 0—5%. Основная погрешность газоанализаторов CO_2 составляет около ±0,5% CO_2 и $CO + H_2$ ±0,15% $CO + H_2$.

Для питания электрических схем газоанализаторов применяют аккумуляторные батареи или выпрямители переменного тока со стабилизацией напряжения. Напряжение постоянного тока питания приборов около 10 *в*.

§ 5. МАГНИТНЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР НА КИСЛОРОД

Газообразный кислород имеет парамагнитные свойства во много раз бо́льшие, чем ряд других газов. Кроме того, его парамагнитные свойства в сильной степени зависят от температуры, при нагревании они уменьшаются. Это явление положено в основу магнитного газоанализатора на кислород, принципиальная схема которого приведена на рис. 6. 16. Датчик газоанализатора выполнен в виде кольцевой камеры с поперечной перемычкой из стеклянной трубки. На поперечной трубке расположены две нагревательные обмотки из тонкой платиновой проволоки. Обе эти обмотки включены в схему моста постоянного тока. Одна из обмоток расположена в поле постоянного магнита. Молекулы кислорода из анализируемой газовой смеси под действием магнитного поля втягиваются в поперечную трубку. По-

падая в область левой подогревной обмотки, кислород нагревается и его магнитные свойства уменьшаются. В результате этого в поперечной трубке образуется поток газа, направленный слева направо. Более холодный газ проходит в область магнитного поля и левой нагревательной обмотки; в зоне правой обмотки газ протекает уже более нагретый. Таким образом, левая обмотка охлаждается в большей степени, чем правая.

Изменения сопротивления обмоток нарушают равновесие моста и вызывают отклонения указателя измерительного прибора. Степень нарушения равновесия моста находится в зависимости от концентрации кислорода в анализируемой смеси. При отсутствии кислорода поток газа в поперечной трубке отсутствует и мост находится в равновесии.

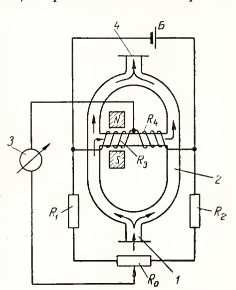


Рис. 6.[illegible] Схема магнитного газоанализатора на кислород.

1 — линии ввода газа; 2 — кольцевая камера; 3 — измерительный прибор; 4 — линия выхода газа; N — S — постоянный магнит; $Б$ — батарея; R_0 — регулятор нуля; R_1 и R_2 — постоянные сопротивления; R_3 и R_4 — нагревательные элементы.

Магнитные газоанализаторы выпускаются различных модификаций со шкалами от 0—5 до 95—100%. Ими определяют как содержание кислорода в смеси с другими газами, так и чистоту кислорода. Основная погрешность $\pm 5\%$ от диапазона шкалы. В качестве измерительного прибора могут быть использованы показывающие и самопишущие милливольтметры или потенциометры. Магнитные газоанализаторы применяют для анализа газов процессов горения в топках паровых котлов и т. п.

§ 6. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДНЫХ ИОНОВ — pH-МЕТРЫ

Концентрация водородных ионов является весьма важным параметром в ряде технологических процессов. С определением величины концентрации водородных ионов в промышленных условиях мы встречаемся, например, при контроле процесса получения алюмосиликатного катализатора для установок каталитического крекинга.

Известно, что для чистой воды на основании закона действующих масс произведение K_w — числа ионов водорода на гидроксильные ионы, образующиеся в процессе ее электролитической диссоциации,

есть величина постоянная и при 22° равна 10^{-14}, т. е.

$$K_w = [H^+]\,[OH^-] = 10^{-14}. \quad (6.4)$$

Поскольку реакция воды нейтральна, то

$$[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}. \quad (6.5)$$

Отсюда следует, что в нейтральном водном растворе концентрация водородных ионов равна 10^{-7}. При увеличении концентрации водородных ионов раствор становится кислым, а при уменьшении в силу (6. 4) увеличивается концентрация гидроксильных ионов и раствор приобретает щелочную реакцию. Таким образом, величина концентрации ионов водорода того или иного водного раствора характеризует степень его кислотности или щелочности. Характер реакции растворов определяют так называемые активные ионы водорода, причем их концентрация в растворе несколько меньше общей или реальной концентрации, так как они частично вступают во взаимодействие с гидроксильными ионами в процессе диссоциации. Это относится главным образом к растворам электролитов большой концентрации. В слабых растворах электролитов преобладают активные ионы. Для удобства величину концентрации водородных ионов выражают символом pH, причем

$$pH = -\lg[H^+] = \lg\frac{1}{[H^+]}, \quad (6.6)$$

т. е. символ pH означает отрицательный десятичный логарифм активной концентрации водородных ионов.

Для нейтральных растворов, при $[H^+] = 10^{-7}$, $pH = 7$. Кислые растворы имеют pH меньше, а щелочные больше 7. Весь диапазон изменения величины pH растворов от самого кислого до самого щелочного характеризуется рядом чисел от 0 до 14. Из определения следует, что увеличение или уменьшение величины pH на единицу означает увеличение или уменьшение концентрации водородных ионов в 10 раз.

Существуют два основных метода измерения pH растворов — колориметрический и электрометрический. Первый основан на характерном изменении цвета некоторых веществ при их взаимодействии с растворами. На этом методе основано применение различных бумажных индикаторов pH. На полоску фильтровальной бумаги наносят состав вещества, способного принимать определенный цвет в зависимости от величины pH воздействующего на него раствора. Приготовляют набор таких полосок, обработанных разными веществами или одним и тем же, но в разных концентрациях. Изменение цвета происходит при разных значениях pH, величина которого отмечается на каждой полоске. Измерение состоит в последовательном погруже-

нии полосок в испытуемый раствор и фиксировании pH той полоски, которая изменила свой цвет. Этот способ является приближенным, но простым и быстрым. Существуют и жидкие индикаторы pH, представляющие собой растворы определенных веществ, способные изменять свою окраску при добавлении к ним растворов с определенным значением pH.

Электрометрический метод является наиболее точным и позволяет измерять pH как светлых, так и непрозрачных растворов.

pH-метры, основанные на электрометрическом методе, состоят из датчика и вторичного электрического измерительного прибора.

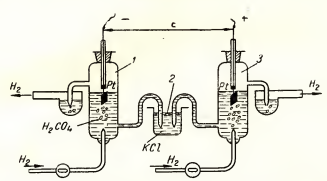


Рис. 6. 17. Устройство водородного электрода и схема измерения им pH растворов.

1 — сравнительный нормальный водородный электрод; *2* — промежуточный раствор; *3* — измерительный водородный электрод.

Датчик содержит два электрода, погружаемых в испытуемый раствор, образующих гальванический элемент, э. д. с. которого зависит от pH раствора. Вторичный прибор измеряет величину э. д. с. электродов и дает показания в единицах pH.

Один из электродов датчика является основным или измерительным. Именно его потенциал зависит от pH испытуемого раствора. Другой электрод называется сравнительным и служит только для того, чтобы можно было измерять без искажений изменения потенциала основного электрода. Потенциал же сравнительного электрода не должен изменяться в процессе измерения и не должен зависеть от pH испытуемого раствора.

В основу электрометрического метода положено свойство так называемого водородного электрода изменять свой потенциал в определенной закономерности от pH раствора, в который он погружен.

Устройство водородного электрода и схема измерения им pH растворов приведены на рис. 6. 17. Водородный электрод состоит из

сосуда с жидкостью, в которую погружена платиновая пластинка, покрытая мелко раздробленной платиной (платиновой чернью). Пластинка непрерывно обдувается водородом при атмосферном давлении. Водород адсорбируется платиной, образует на ее поверхности слой, соприкасающийся с жидкостью.

Один из электродов, заполненный раствором серной кислоты концентрации $[H^+] = 1$, ($pH = 0$), является сравнительным. Второй электрод, заполняемый поочередно жидкостью той или иной концентрации, подлежащей определению, является измерительным. Чтобы не было непосредственного контакта жидкостей, заполняющих электроды, электрическая цепь между ними выполнена при помощи вспомогательного сосуда, заполненного промежуточной электропроводящей жидкостью (раствором хлористого калия KCl).

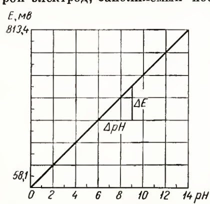


Рис. 6. 18. График зависимости E от pH для водородного электрода.

Один из электродов — сравнительный — называется нормальным водородным электродом. Его потенциал условно принимают равным нулю. На основании теории электродных потенциалов, описываемой в курсе физической химии, согласно основному уравнению Нернста э. д. с. элемента из двух водородных электродов определяется уравнением

$$E = 0{,}0001982\,(273 + t)\ \mathrm{pH}, \qquad (6.7)$$

где E — э. д. с. в *в*;

t — температура в °С;

pH — концентрация водородных ионов в единицах pH раствора, заполняющего измерительный элемент.

Выражение $0{,}0001982\,(273+t)$ обозначают буквой ξ; тогда

$$E = \xi\ \mathrm{pH}. \qquad (6.8)$$

Величина ξ для водородного электрода при 20° С равна 58,1 *мв*.

Если измерительный электрод (рис. 6. 17) заполнить раствором, имеющим $pH = 0$, то э. д. с. элемента из двух электродов будет равна нулю; при заполнении раствором с $pH = 1$ э. д. с. равна 58,1 *мв* и т. д. При увеличении pH раствора измерительного электрода на единицу э. д. с. увеличивается на 58,1 *мв*. График зависимости E от pH для водородного электрода приведен на рис. 6. 18. Как видно,

зависимость эта прямолинейная. Величина ξ определяется из соотношения

$$\xi = \frac{\Delta E}{\Delta \text{pH}}. \quad (6.9)$$

С изменением температуры на каждый градус величина ξ изменяется примерно на 0,2 *мв*.

Водородный электрод применяют сравнительно редко (лишь в лабораторной практике); для промышленных измерений он мало пригоден из-за необходимости иметь источник газообразного водорода и продувки. Кроме того, на свойство водородного электрода отрицательно влияют некоторые окисляющие вещества (соли азотной кислоты, хромовой, хлорноватой и др.) и восстановители (сернистый ангидрид и др.). Влияют также вещества, которые адсорбируются платиной.

В настоящее время для измерения pH применяют в качестве измерительного хингидронный, сурьмяный и стеклянный электроды, в качестве сравнительного — в основном насыщенный каломельный электрод.

Существует несколько разновидностей каломельных электродов, но у всех потенциал образуется на грани соприкосновения металлической ртути с пастой из каломели ($HgCl_2$). По отношению к нормальному водородному электроду потенциал каломельного электрода при 20° С равен 248 *мв*. Устройство каломельных электродов двух видов приведено на рис. 6. 19. Один из них (рис. 6. 19, *а*) лабораторный и предназначен для установки на штативе. Контакт с испытуемой средой осуществляется через асбестовое волокно, впаянное в защитную пробирку с насыщенным раствором хлористого калия (KCl). Электрическая цепь замыкается через смоченный шлиф нижней стеклянной пробки. Ватный тампон служит для предохранения от выпадения пасты каломели и ртути. Уровень раствора хлористого калия в наружной пробирке должен быть всегда выше уровня испытуемой жидкости в стакане, чтобы последняя не могла проникнуть внутрь каломельного электрода.

На рис. 6. 19, *б* показано устройство каломельного электрода, предназначенного для длительной работы при промышленных измерениях. Электрод снабжен напорным сосудом для запасного раствора KCl. В нижней части электрода для контакта с испытуемым раствором имеется донышко из пористого фарфора.

Электродвижущая сила E элемента, образованного из измерительного водородного и сравнительного каломельного электродов, равна сумме их э. д. с.

$$E = E_1 + \xi \, \text{pH}, \quad (6.10)$$

где E_1 — э. д. с. каломельного электрода;

$\xi \, \text{pH}$ — э. д. с. водородного электрода согласно (6. 8).

Отсюда

$$pH = \frac{E - E_1}{\xi}. \qquad (6.11)$$

Из (6. 11) следует, что введение каломельного электрода не изменяет характеристики водородного электрода. Величина ξ последнего сохраняется.

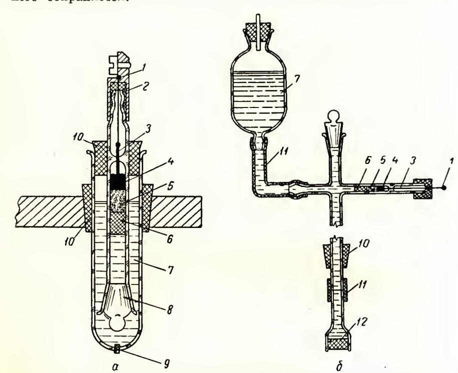


Рис. 6. 19. Сравнительный каломельный насыщенный электрод.

а — лабораторный; *б* — промышленный; *1* — контакт; *2* — цемент; *3* — платиновая проволока; *4* — ртуть; *5* — каломель; *6* — вата; *7* — раствор KCl; *8* — притертая пробка на шлифе; *9* — асбест; *10* — резинован пробка; *11* — резиновая трубка; *12* — пористый фарфор.

Применение в качестве измерительных хингидронного, сурьмяного и стеклянного электродов основано на том, что их свойства в большей или меньшей степени приближаются к свойствам водородного электрода.

Название «хингидронный электрод» следует отнести не буквально к одному электроду, а скорее к методу, так как этот электрод приготовляется при каждом измерении. Метод хингидронного электрода состоит в следующем. В стакан с испытуемым раствором (рис. 6. 20) добавляют хингидрон в количестве, достаточном для насыщения

раствора, и перемешивают. В этот же раствор погружают платиновый электрод и каломельный.

Хингидрон есть соединение двух органических веществ — хинона и гидрохинона ($C_6H_4O_2 \cdot C_6H_6O_2$); он имеет вид порошка мелкокристаллического строения темно-зеленого цвета. При растворении хингидрон частично распадается на хинон и гидрохинон. Последний в свою очередь частично распадается на хинон и водород. Ионы водорода распределяются между раствором и платиной, которая становится водородным электродом. Если составить элемент их хингидронного и нормального водородного электродов, поместив их в раствор кислоты с концентрацией водородных ионов $[H^+] = 1 (pH = 0)$, то измерения э. д. с. дадут нормальный электродный потенциал хингидронного электрода:

$$E_{0\,\text{хин}} = 703 \text{ мв при } 20°\,C.$$

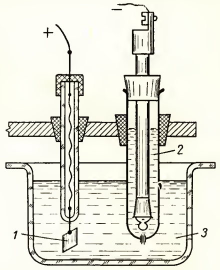


Рис. 6. 20. Измерение pH хингидронным электродом.

1 — платиновый электрод; 2 — каломельный электрод; 3 — стакан с испытуемым раствором.

Э. д. с. $E_{\text{хин}}$ элемента из хингидронного и нормального водородного электродов при концентрациях ионов водорода $[H^+] < 1 (pH > 0)$ определяют по уравнению

$$E_{\text{хин}} = E_{0\,\text{хин}} - 0{,}0001982\,(273 + t)\,pH$$

или

$$E_{\text{хин}} = E_{0\,\text{хин}} - \xi\, pH. \qquad (6.\,12)$$

Как видно, изменения э. д. с. такого элемента определяются свойствами хингидронного электрода, величина ξ которого такая же, как и у водородного электрода.

Э. д. с. E_x элемента, составленного из хингидронного и каломельного электродов (рис. 6. 20), определяют по уравнению

$$E_x = E_{0\,\text{хин}} - \xi\, pH - E_{\text{кал}}, \qquad (6.\,13)$$

откуда

$$pH = \frac{(E_{0\,\text{хин}} - E_{\text{кал}}) - E_x}{\xi}. \qquad (6.\,14)$$

Хингидронный электрод применяется лишь для измерений кислой среды и слабощелочной порядка до 9 pH. На его показания влияет ряд веществ — окислителей и восстановителей. Им нельзя измерять pH

проточной жидкости и жидкостей, находящихся в больших емкостях. Он применяется лишь в лабораторной практике.

Э. д. с. хингидронного электрода измеряют потенциометрическим методом при помощи переносных потенциометров с соответствующими пределами измерения. В качестве нуля индикатора используется обычный нуль-гальванометр.

Сурьмяный электрод (рис. 6. 21) получил распространение для промышленных измерений. Он прост по конструкции, прочен. Может применяться для измерений от 1 до 13 pH проточных жидкостей и хранящихся в любых емкостях как при атмосферном, так и при небольших избыточных давлениях.



Рис. 6. 21. Сурьмяный электрод.

1 — сурьма; 2 — фарфоровая трубка; 3 — эбонитовый колпачок; 4 — медный провод.

Электродный потенциал сурьмяного электрода возникает на границе металла и его окиси. Окись сурьмы легко образуется от действия кислорода воздуха. Зависимость потенциала E сурьмяного электрода от концентрации водородных ионов прямолинейна и выражается уравнением

$$E = E_0' + b\,\mathrm{pH}, \qquad (6.15)$$

где E_0' — э. д. с. при $\mathrm{pH} = 0$ (зависит от сравнительного электрода, химического состава раствора и температуры);

b — приращение э. д. с. на 1pH; отличается от ξ и в среднем равно 53 *мв*.

Недостаток сурьмяного электрода состоит в том, что его потенциал зависит в некоторой степени и от состоянии окисной пленки сурьмы и может изменяться незакономерно. Кроме того, его показания искажаются от влияния ряда веществ (соли свинца, олова, сероводорода и др.).

При пользовании сурьмяным электродом в качестве сравнительного применяют обычно каломельный электрод. Для достижения более или менее точных измерений показания элемента с сурьмяным электродом необходимо часто проверять. Э. д. с. элемента с сурьмяным электродом, так же как и хингидронного, может быть измерена обычным потенциометром с нуль-гальванометром.

Показания элемента с сурьмяным электродом (а также и с другими электродами) поверяют при помощи буферных растворов.

Буферными называют растворы, устойчиво сохраняющие определенную концентрацию ионов водорода, а следовательно, и величину pH. Концентрация буферных растворов мало изменяется от разбавления и даже от прибавления некоторого количества кислоты или щелочи. Приготовляют буферные растворы из смеси слабой кислоты и ее соли или слабого основания и его соли. Существует

большое количество рецептов смесей буферных растворов, охватывающих область значений pH от 1 до 12. Для проверки показаний промышленных pH-метров достаточно иметь 3—4 буферных раствора, имеющих pH около 2, 4, 8 и 9. Для приготовления буферных растворов используют химически чистые реактивы. В качестве примера ниже приведено несколько составов следующих буферных растворов:

1) pH = 2,2; из 50 *мл* 0,1 *M* (молярного) раствора бифталата калия + 46,70 *мл* 0,1 н. раствора HCl + вода до 100 *мл*;

2) pH = 4,6; из 50 *мл* 0,2 н. раствора уксусной кислоты + + 50 *мл* 0,2 н. раствора ацетата натрия;

3) pH = 7,94; из 75 *мл* 0,2 *M* раствора борной кислоты + 25 *мл* 0,05 *M* раствора буры;

4) pH = 9,24; 0,05 *M* раствора буры.

Наибольшее распространение получил стеклянный электрод, который может применяться для измерения pH светлых и мутных водных жидкостей в состоянии покоя и в потоке. На показания стеклянного электрода не оказывает вредного влияния большинство тех веществ, которые ограничивают применение хингидронного и сурьмяного электродов. Стеклянные электроды могут применяться и в условиях среды с давлением до 5 $кГ/см^2$, при температуре до 100° С. Существует много разновидностей стеклянных электродов в зависимости от их формы, заполнения, сорта стекла и т. п., но все они основаны на электродных свойствах некоторых сортов стекла. Долгое время применение стеклянных электродов ограничивалось вследствие трудностей измерения его потенциала. Объясняется это очень большим его сопротивлением, что не позволяет применять обычные потенциометры с нуль-гальванометром. Лишь с развитием электроники это затруднение было устранено, и в настоящее время существуют приборы, позволяющие измерять э. д. с. элемента со стеклянным электродом практически при любых величинах его сопротивления.

Устройство распространенного стеклянного электрода приведено на рис. 6. 22. К концу стеклянной трубки из обычного не электродного стекла припаян тонкостенный шарик (0,1—0,2 *мм*) из электродного стекла. Внутренняя полость шарика заполнена децинормальным раствором соляной кислоты, в которую погружен хлоросеребряный полуэлемент. Последний представляет собой кусочек платиновой проволоки, впаянной в стеклянную трубку малого диаметра. Выступающий участок этой проволоки электролитическим способом покрывается слоем серебра и поверх него слоем хлористого серебра. Верхние концы стеклянных трубок спаяны между собой. Вывод — медный провод от хлоросеребряного электрода припаян к контакту.

Электродное стекло отличается от обычного тем, что оно имеет повышенную электропроводность и электродные свойства, благодаря которым на его поверхности, соприкасающейся с раствором, возни-

кает потенциал, пропорциональный концентрации водородных ионов.

Существует несколько сортов электродных стекол. Наиболее распространенными являются известково-натриевое (72% SiO_2, 8% CaO, 20% Na_2O) и литиевое (72% SiO_2, 6% CaO и 22% Li_2O). Первое имеет сравнительно небольшое сопротивление, второе во много раз большее. Преимущество электродов из литиевого стекла — возможность применения их при высоких (до 100° С) температурах, тогда как электроды из других сортов стекла могут применяться лишь до 40—55° С.

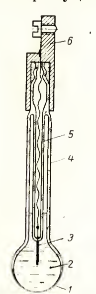


Рис. 6. 22. Стеклянный электрод.

1 — реагирующая часть; *2* — раствор HCl; *3* — хлоросеребряный вспомогательный электрод; *4* и *5* — стеклянные трубки; *6* — контакт с клеммой.

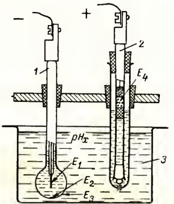


Рис. 6. 23. Схема элемента из стеклянного и каломельного электродов.

1 — стеклянный электрод; *2* — каломельный электрод; *3* — испытуемый раствор.

В качестве сравнительного со стеклянным электродом обычно используется насыщенный каломельный электрод. Схема элемента из стеклянного и каломельного электродов представлена на рис. 6.23. Э. д. с. такого элемента равна сумме потенциалов: E_1 — хлоросеребряного электрода, E_2 — внутренней поверхности стеклянного электрода, E_3 — наружной поверхности стеклянного электрода и E_4 — каломельного электрода.

Потенциалы E_1, E_2 и E_4 постоянны и не зависят от pH испытуемого раствора, потенциал E_3 зависит от pH раствора. Таким образом, э. д. с. элемента изменяется лишь с изменением потенциала наружной поверхности стеклянного электрода, погруженной в испытуемый раствор, т. е. с изменением pH этого раствора.

По теории стеклянного электрода возникновение потенциала на его поверхности, соприкасающейся с раствором, объясняется обме-

ном ионов натрия стекла с ионами водорода раствора. Приращение этого потенциала определяется величиной ξ:

$$\xi = \frac{\Delta E}{\Delta \mathrm{pH}}.$$

Теоретическая величина ξ стеклянного электрода равна 58 *мв* при 20° С, но практически она для разных электродов может быть от 54 до 59 *мв*. Как видно, стеклянный электрод по своим свойствам приближается к водородному.

При подключении измерительного прибора к электродам образуется электрическая цепь, в которую входит и стенка шарика стеклянного электрода.

Э. д. с. (E_x) элемента из стеклянного и каломельного электродов определяют из уравнения

$$E_x = \xi \, \mathrm{pH}_x + E_c, \qquad (6.16)$$

откуда

$$\mathrm{pH}_x = \frac{E_x - E_c}{\xi}, \qquad (6.17)$$

где

$$\xi \, \mathrm{pH}_x = E_3$$

и

$$E_c = E_1 + E_2 + E_4.$$

Рис. 6. 24. Зависимость э. д. с. от pH для элемента из стеклянного и каломельного электродов.

Численное значение E_c определяют экспериментально. Для стеклянного электрода с хлоросеребряным полуэлементом и каломельного электрода при 20° С E_c равна –104 *мв*; тогда

$$\mathrm{pH}_x = \frac{E_x + 104}{58}. \qquad (6.18)$$

Отсюда следует, что э. д. с. (E_x) такого элемента равна нулю при pH $\approx$ 1,8. График зависимости E_x от pH$_x$ приведен на рис. 6. 24. Прямолинейный участок кривой ограничивается зоной примерно от 1 до 11 pH. В сильно кислой и сильно щелочной средах свойства стеклянного электрода отличаются от свойств водородного электрода, и измерения в этих зонах требуют особой тарировки стеклянного электрода. Величина ξ стеклянного электрода, так же как и водородного, зависит от температуры и изменяется примерно на 0,2 *мв* при изменении температуры на 1° С.

Существуют стеклянные электроды с каломельным и некоторыми другими полуэлементами, характеристики которых отличаются от электрода с хлоросеребряным полуэлементом значениями pH при 0 э. д. с. Угол наклона характеристик (величина ξ) для всех видов стеклянных электродов одинаков.

Стеклянный электрод имеет потенциал асимметрии, благодаря которому теоретическая зависимость от pH, определенная по уравнению (6. 16), несколько отличается от полученной экспериментально.

Возникновение потенциала асимметрии объясняется различными электродными свойствами внутренней и наружной поверхностей шарика стеклянного электрода из-за неодинаковых температурных условий для этих поверхностей во время изготовления. Величина потенциала асимметрии для отдельных электродов колеблется от 5 до 15 *мв*. Электроды с тонкой стенкой шарика имеют более низкий потенциал асимметрии, чем с толстой.

Вследствии потенциала асимметрии стеклянные электроды не взаимозаменяемы; это учитывается при проверке их показаний по буферным растворам.

pH-метры подразделяют на лабораторные и промышленные. Датчик лабораторного pH-метра имеет вид штатива, на кронштейне которого укреплены электроды. Под электроды устанавливают стакан с испытуемым раствором. Датчик располагают вблизи измерительного прибора, чтобы соединительные провода были как можно короче. Измерительным прибором лабораторных pH-метров является обычно потенциометр переносного типа с ручным управлением. Измерения лабораторным pH-метром периодические. Стакан заполняют пробой вручную. После каждого измерения пробу выливают и стакан промывают.

Необходимые поправки на температуру электродов вносят в показания или путем вычисления, или ручной коррекцией указателя, или сдвигом шкалы потенциометра.

Промышленные потенциометры измеряют pH непрерывно. Их датчики имеют особоую конструкцию и подразделяются на проточные и погружные. Поправка на изменение температуры электродов вносится автоматически, для чего датчики промышленных pH-метров, кроме двух электродов, содержат еще медный термометр сопротивления, называемый температурным компенсатором. Конструкция датчика должна защищать электроды от возможных механических повреждений. Схематическое устройство проточного и погружного датчиков приведено на рис. 6. 25. Жидкость к проточному датчику подводится по трубкам от технологического аппарата или трубопровода. Давление жидкости должно быть снижено почти до атмосферного. Отработанная жидкость стекает через открытую трубку в канализацию или сборную емкость.

Погружной датчик имеет жезловую конструкцию. Длина жезла определяет его глубину погружения и может достигать 1,5—2 *м*. Имеются погружные датчики с каломельным электродом и напорным бачком. От датчиков к прибору прокладывают четыре провода: по одному от электродов и два от температурного компенсатора. Длина проводов может быть до 50—60 *м*.

Сопротивление стеклянных электродов при 20° С может быть от 20 до 100 *мгом*. Кроме того, оно очень сильно увеличивается при понижении температуры. При измерении э. д. с. датчика со стеклянным электродом в цепи электродов не должен протекать ток или он должен быть ничтожно мал (не более 10^{-11} *а*). В противном случае падение напряжения на стеклянном электроде будет сильно искажать показания прибора.

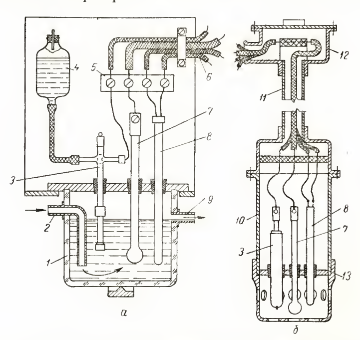


Рис. 6. 25. Датчики промышленных pH-метров.

а — проточный; *б* — погружной; *1* — стеклянный сосуд; *2* — линия ввода жидкости; *3* — каломельный электрод; *4* — напорный бачок с KCl; *5* — клеммная панель; *6* — провода; *7* — стеклянный электрод; *8* — температурный компенсатор; *9* — линия выхода жидкости; *10* — погружной герметичный стакан; *11* — трубка — жезл; *12* — клеммная коробка; *13* — защитный кожух с отверстиями.

В связи с этим для измерения э. д. с. датчиков со стеклянным электродом применяют специальные электронные приборы, практически не потребляющие ток из цепи источника э. д. с. и имеющие высокое входное сопротивление. Схемы pH-метров имеют особенности в связи с непостоянной характеристикой электродов (изменение значения ξ) и зависимостью ее от температуры.

На рис. 6. 26 приведена простейшая схема лабораторного pH-метра с батарейным питанием *. Схема состоит из измерительной части

* Разработана СКБ АНН.

и электронного нуль-индикатора. Измерительная часть имеет последовательно соединенные сопротивления $R_б$, $R_ш$, $R_д$ и $R_р$, по которым протекает ток батареи $Б_и$.

Сопротивление реохорда $R_р$ выполнено в виде спирали, закрепленной на диске, который при помощи рукоятки может вращаться относительно неподвижного движка (точка *б*). На диске расположена также шкала прибора в единицах pH. Через ось вращения реохорда

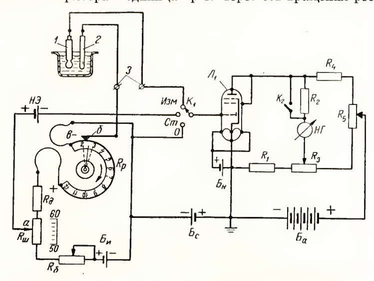


Рис. 6. 26. Схема лабораторного pH-метра с батарейным питанием.

1 — стеклянный электрод; 2 — каломельный электрод; 3 — клеммы; K_1 — переключатель; K_2 — ключ нуль-гальванометра.
Источники питания: $Б_и$ — измерительной схемы; $Б_н$ — накала лампы; $Б_с$ — напряжения смещения; $Б_а$ — анодной цепи.
$R_р$ — реохорд; $R_б$, $R_ш$, $R_д$, R_1, R_2 R_3, R_4 и R_5—сопротивления; НЭ — нормальный элемент; $Л_1$ — электронная лампа 2П1П; НГ — нуль-гальванометр.

пропущена ось указателя шкалы, который при вращении диска остается неподвижным. Положение указателя можно в небольших пределах изменять вручную.

Измерительная часть схемы содержит еще нормальный элемент и переключатель K_1. Э. д. с. электродов измеряется компенсационным методом, путем сравнения ее с компенсирующей разностью потенциалов на участке между точкой *в* и положением движка точкой *б*. Напряжение небаланса подается на сетку лампы нуль-индикатора. Электронный нуль-индикатор представляет собой мост, плечами которого являются сопротивления промежутка сетка — катод лампы $Л_1$, R_4, R_5 + часть R_3 и R_1 + другая часть R_3. Мост питается постоянным током от батареи $Б_а$, к нему подключен стрелочный

нуль-гальванометр *НГ*. Ключ K_2 служит для закорачивания сопротивления R_2 и тем самым изменения чувствительности нуль-гальванометра. Мост приводится в равновесие при определенном напряжении смещения на сетке лампы. Напряжение смещения подается от батареи $Б_c$ через измерительную часть схемы. Электроды, укрепленные на штативе, погружаются в стакан с раствором и подключаются проводами к прибору. В связи с тем, что стеклянные электроды не взаимозаменяемы и что они могут иметь разную величину ξ, перед измерениями шкалу pH-метра проверяют по буферным растворам с известным pH.

Работа с лабораторным pH-метром протекает в следующей последовательности.

1. Проверяют нулевую точку нуль-индикатора. Переключатель K_1 устанавливают в положение 0. При этом на сетку лампы $Л_1$ подается напряжение смещения, равное э. д. с. батареи $Б_c$. Стрелка нуль-гальванометра устанавливается на нулевое деление регулировкой сопротивлений R_5 и R_3.

2. Электроды погружают в буферный раствор с таким значением pH, при котором их э. д. с. близка к нулю. Как было показано, для стеклянного электрода с хлоросеребряным полуэлементом и каломельного электрода это значение pH близко к 2. Переключатель K_1 переводят в положение *Изм*. При этом э. д. с. электродов включена навстречу компенсирующей разности потенциалов на участке *в* — *б* реохорда. Сопротивление участка сетка — катод лампы нуль-индикатора включено в цепь тока небаланса. На сетку лампы подается напряжение, равное алгебраической сумме напряжений батареи $Б_c$ и небаланса. Мост выводится из равновесия, стрелка нуль-гальванометра отклоняется. Поворачивают реохорд до такого положения, при котором стрелка нуль-гальванометра устанавливается на нуль, т. е. когда напряжение небаланса станет равным нулю. Перемещают вручную указатель шкалы прибора на значение pH буферного раствора, равное 2.

3. Электроды, предварительно промытые, погружают в буферный раствор с pH, лежащим вблизи верхнего предела измерения, например 9,24. Переключатель K_1 оставляют в положении *Изм*. Вращая реохорд, устанавливают деление шкалы 9,24 против указателя. Если стрелка нуль-гальванометра отклоняется, то ее устанавливают на нуль регулировкой реостата батареи измерительной части схемы.

4. Электроды погружают снова в раствор в pH = 2 и повторяют действия по п. 2, а затем в растворе pH = 9,24 и т. д. Так продолжают действовать до тех пор, пока показания прибора не будут точно соответствовать значениям pH буферных растворов. Обычно для этого достаточно проделать по два повторых измерения с каждым раствором.

5. Переключатель K_1 переводят в положение *Ст* (стандартизация) и стрелку нуль-гальванометра устанавливают на нуль, перемещая

движок сопротивления $R_ш$ цепи батареи. На сетку лампы нуль-индикатора подается напряжение, равное алгебраической сумме напряжения батареи $Б_c$ и напряжения небаланса, в данном случае равного разности э. д. с. нормального элемента и напряжения между точками *а* и *в* измерительной цепи. При этом ток в цепи батареи не изменяется. Изменяется разность потенциалов между точками *а* и *в*, которой компенсируется э. д. с. нормального элемента *НЭ*. В отличие от потенциометров для измерения э. д. с. термопары в этом приборе при операции «стандартизация» ток батареи не регулируется, а лишь фиксируется его значение, установленное при проверке шкалы по буферным растворам. Значение этого тока в виде величины ξ отсчитывается по шкале сопротивления $R_ш$. Таким образом, при операции «стандартизация» находят величину ξ, по которой судят о качестве данного стеклянного электрода. Для исправного электрода ξ должно быть в пределах 54—60 *мв* на 1рН при 20° С.

После проверки шкалы прибора по буферным растворам можно приступать к серии измерений неизвестных значений рН испытуемых растворов. В процессе измерений необходимо поддерживать температуру растворов такой же, какой была температура буферных растворов. В этом случае не нужно вносить в показания поправку на температуру стеклянного электрода.

Существует большое число разновидностей лабораторных рН-метров. В большинстве случаев они отличаются между собой по принятым схемам нуль-индикаторов, способу питания электроэнергией (от сети или от батарей) и некоторым другим признакам. Как правило, лабораторные рН-метры имеют двойную шкалу, градуированную в единицах рН и в милливольтах (до 700—800 *мв*). Это позволяет пользоваться ими при работе с хингидронным и сурьмяным электродами, а также при поверках самопишущих рН-метров.

Имеется также несколько разновидностей самопишущих автоматических рН-метров. В них э. д. с. электродов компенсируется автоматически специальным устройством, которое аналогично по своему действию и конструкции автоматическим электронным потенциометрам для измерения э. д. с. термопары.

Схемы самопишущих рН-метров содержат измерительную часть и электронный нуль-индикатор. Шкала самопишущего рН-метра перед измерениями должна быть проверена по буферным растворам, в измерительной части схемы должны быть предусмотрены элементы для регулировки тока. Существенным отличием схем самопишущих рН-метров является наличие устройства для автоматического внесения поправки в показания при изменении температуры электродов. Устройство это состоит из дополнительного медного термометра сопротивления, устанавливаемого в датчике вместе с электродами. Термометр этот называют температурным компенсатором.

Упрощенная схема одного из автоматических самопишущих рН-метров приведена на рис. 6. 27. Э. д. с. электродов измеряется

компенсационным методом. Измерительная цепь питается постоянным током от выпрямителя и состоит из трех параллельных ветвей: R_6 и $R_р$, зашунтированного сопротивлением R_5; R_0 и R_4 и сопротивления температурного компенсатора $R_т$. Компенсирующее напряжение возникает между точками *а* и *б* измерительной цепи, оно может изменяться от перемещения движка реохорда $R_р$. Кроме того, это же компенсирующее напряжение изменяется в зависимости от величины

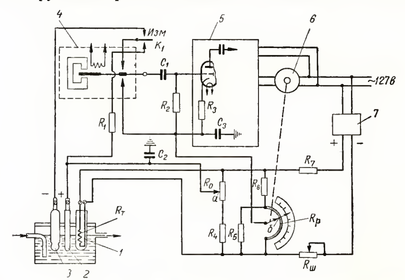


Рис. 6.27. Упрощенная схема самопишущего автоматического pH-метра.

1 — температурный компенсатор; *2* — каломельный электрод; *3* — стеклянный электрод; *4* — вибропреобразователь; *5* — электронный усилитель; *6* — реверсивный двигатель; *7* — выпрямитель; K_1 — ключ проверки нуля; C_1, C_2, C_3 — конденсаторы; $R_т$ — сопротивление температурного компенсатора; R_0 — сопротивление регулировки нуля; $R_р$ — реохорд; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7 — постоянные сопротивления; $R_ш$ — переменное сопротивление.

сопротивления температурного компенсатора соответственно колебаниям э. д. с. электродов от температуры. Так достигается автоматическое компенсирование ошибки в показаниях прибора от влияния температуры испытуемого раствора, в котором находятся электроды и температурный компенсатор.

В цепь тока небаланса включен вибропреобразователь, в котором напряжение небаланса преобразовывается в переменное напряжение. Преобразование достигается зарядкой и разрядкой на сопротивление R_2 конденсатора C_1 при замыканиях контактов вибропреобразователя с частотой 50 *гц*. Переменное напряжение небаланса подается на сетку первой лампы электронного усилителя. Усиленное напряжение небаланса управляет вращением реверсивного двигателя, который через механическую передачу перемещает движок реохорда в сторону

баланса схемы. Одновременно перемещается указатель шкалы прибора. Самопишущий pH-метр также требует проверки шкалы по буферным растворам. Нулевая точка регулируется сопротивением R_0, а ток в измерительной цепи — сопротивлением $R_ш$. Это сопротивление имеет шкалу с делениями в *мв* величины ξ.

Особенностью pH-метров лабораторных и самопишущих является необходимость в очень высокой изоляции цепи стеклянного электрода, что вызвано большим его сопротивлением. Провод от стеклянного электрода, клеммы прибора, детали ключа K_1, вибропреобразователи и конденсатор C_1 должны иметь изоляцию с сопротивлением по отношению к земле, во много раз превышающим сопротивление стеклянного электрода. В противном случае токи утечки через изоляцию будут иметь соизмеримое значение с током в цепи стеклянного электрода, что приведет к значительным искажениям показаний прибора. Кроме того, цепь стеклянного электрода должна быть хорошо экранирована от воздействия внешних электрических полей, чтобы предотвратить появление переменных напряжений наводки, также сильно искажающих показания прибора. Благодаря этим особенностям обслуживание pH-метров значительно сложнее обслуживания потенциометров для измерения температуры.

§ 7. АНАЛИЗАТОРЫ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В НЕФТИ

Нефть, поступающая на переработку, всегда содержит в виде эмульсии некоторое количество воды. Вода попадает в нефть при ее добыче из недр земли и является весьма нежелательной примесью. В особенности вредна вода и содержащиеся в ней растворенные соли при переработке нефти на технологических установках, так как она способствует коррозии аппаратуры, требует излишних затрат на подогрев и т. п. Как правило, поступающая на переработку нефть сначала подвергается обезвоживанию и обессоливанию на специальных установках, для контроля работы которых и требуются автоматические приборы, определяющие непрерывно содержание воды в нефти. Сырая нефть, поступающая на переработку, может содержать до 3—6% воды. После процесса обезвоживания содержание воды в нефти уменьшается до 0,6—1%.

Определение воды в нефти основано на измерении диэлектрической проницаемости, которая при содержании воды до 10% может быть определена по эмпирической формуле

$$\varepsilon_э = \varepsilon_н + 0{,}062\, w, \qquad (6.19)$$

где $\varepsilon_э$ — диэлектрическая проницаемость сырой нефти;
$\varepsilon_н$ — диэлектрическая проницаемость сырой нефти без воды;
w — процентное содержание воды.

Величина $\varepsilon_н$ колеблется в пределах 2,2—2,5 и зависит от состава нефти. Это усложняет задачу измерения, так как на переработку

обычно поступают нефти разного состава из разных районов добычи. Однако исследованиями было доказано, что $\varepsilon_н$ с некоторым приближением может быть выражена как функция плотности нефти.

Последнее обстоятельство дает возможность при измерениях учитывать колебания величины $\varepsilon_н$ не по составу, а по плотности нефти, которая легко определяется опытным путем.

Измерения диэлектрической проницаемости состоят в определении электрической емкости конденсатора, у которого диэлектриком является испытуемая нефть.

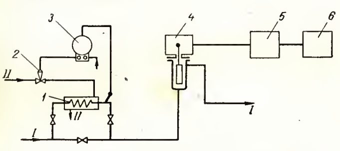


Рис. 6. 28. Монтажная схема анализатора содержания воды в нефти.

1 — холодильник; *2* — регулирующий клапан; *3* — регулятор температуры; *4* — датчик; *5* — электронный блок; *6* — вторичный прибор; *I* — линия нефти; *II* — линия воды.

Монтажная схема анализатора воды в нефти* приведена на рис. 6. 28. Нефть, нагретая до 60—80° С, отбирается от какой-либо точки технологической схемы и по трубке диаметром $^1/_2''$ под давлением протекает через холодильник *1* и датчик *4*. Холодильник снабжен автоматическим регулятором, который поддерживает температуру нефти на выходе постоянной (30—40° С) в целях устранения влияния на показания прибора изменений плотности в зависимости от температуры. Датчик состоит из стального корпуса и изолированного от него стального коаксиально расположенного стержня. В верхней части датчика под кожухом смонтированы некоторые детали электрической схемы, от которых прокладывают специальный одножильный кабель с экранной оплеткой к электронному блоку. Расстояние от датчика до электронного блока не должно превышать нескольких метров. От электронного блока прокладывают два обычных провода к вторичному самопишущему прибору, которым является электронный потенциометр со шкалой 0—10 *мв*. Расстояние между электронным блоком и самопишущим прибором может быть до 300 *м*.

* Разработан СКБ АНН.

На рис. 6. 29 приведена упрощенная электрическая схема электронного блока. Электронная лампа является генератором колебаний. В анодную цепь лампы включен настроенный контур, состоящий из емкости датчика, конденсатора C_2 и катушки индуктивности L. В сеточную цепь лампы включены кварц *Кв* и микроамперметр *М*. К клеммам *А* и *Б* подключают вторичный прибор. При емкости датчика, соответствующей содержанию воды нуль, контур в анодной цепи настроен в резонанс с частотой генератора и при этом сеточный ток лампы имеет максимальное значение (около 120 *мка*).

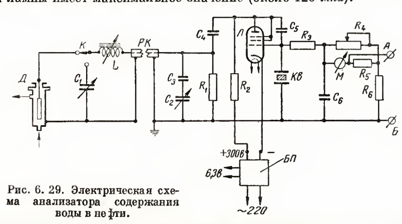


Рис. 6. 29. Электрическая схема анализатора содержания воды в нефти.

Д — датчик; *К* — ключ; *L* — катушка индуктивности; *РК* — кабель; *Л* — электронная лампа 6Ж2П; *Кв* — кварц; *М* — микроамперметр; *БП* — блок питания; *А* и *Б* — клеммы подключения регистратора; C_1 — конденсатор переменный — эквивалент датчика; C_2 — конденсатор переменный для внесения поправки на плотность; C_3—C_6 — конденсаторы постоянные; R_1—R_6 — сопротивления.

С увеличением содержания воды в нефти емкость датчика уменьшается, настройка контура нарушается и сеточный ток лампы ослабевает. Микроамперметр измеряет сеточный ток и имеет шкалу в процентах содержания воды в нефти. На вторичный прибор подается напряжение (0—10 *мв*) с участка цепи сеточного тока. Шкала вторичного прибора градуируется также в процентах содержания воды в нефти. Питается электронный блок переменным током от сети.

Для внесения поправки на плотность служит конденсатор C_2 в анодной цепь лампы. Конденсатор C_1 является контрольным. Его емкость эквивалентна емкости датчика при нулевом содержании воды в нефти. Подключается конденсатор C_1 вместо датчика при помощи ключа *К* при периодических проверках. Конденсатор C_1, ключ *К* и катушка индуктивности L расположены в датчике.

Кварц в цепи сетки предназначен для поддержания заданной частоты генератора (около 2 *Мгц*) и для увеличения крутизны резонансной кривой. Это требуется для повышения чувствительности прибора.

На схеме не показаны некоторые подстроечные конденсаторы и сопротивления, а также другие детали, не имеющие принципиального значения. Прибор может иметь шкалу 0—3% воды в нефти.

Основная погрешность $\pm 1\%$ от диапазона шкалы. Проверку и градуировку шкалы ведут по химически чистым веществам с известной величиной ε.

Существуют и другие разновидности электронных схем и конструкций анализатора воды, основанные на измерении диэлектрической постоянной нефти.

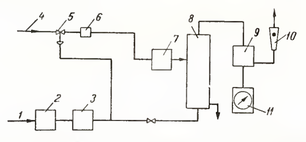


Рис. 6. 30. Укрупненная схема анализатора воды в нефтепродуктах.

1 — линия входа сжатого азота; *2* — фильтр азота; *3* — осушитель азота; *4* — линия входа испытуемого продукта; *5* — отсечной клапан; *6* — фильтр продукта; *7* — дозировочный насос; *8* — колонка; *9* — датчик; *10* — ротаметр; *11* — показывающий прибор.

Для определения количества воды в нефтепродуктах в зарубежной практике применяют анализатор, основанный на кулонометрическом методе (рис. 6. 30). Из отмеренного дозировочным насосом определенного количества продукта путем продувки сухим газом — азотом — отделяется влага. Затем газ с извлеченной им из продукта влагой поступает в датчик анализатора. Чувствительным элементом датчика является спиральная стеклянная трубка диаметром около 3 *мм* и длиной около 1 *м* с прикрепленной к ее внутренним стенкам спиралью из двух тонких платиновых проволочек, не соединенных между собой. Промежутки между витками проволочек покрыты тонким слоем твердой пятиокиси фосфора (P_2O_5), которая интенсивно поглощает влагу. К проволочкам подведено напряжение от источника постоянного тока. При прохождении по трубке азота, содержащего влагу, последняя поглощается пятиокисью фосфора, которая становится проводником тока. В результате начинается электролиз воды с выделением кислорода и водорода, которые уносятся потоком азота.

Кулонометрами называют приборы для измерения тока по количеству выделившегося вещества при электролизе согласно закону Фарадея. В описываемом же приборе решается обратная задача, т. е. по величине тока электролиза определяется количество воды, подвергшейся электролизу, содержащейся в известном объеме газа.

Количество продукта, поступающего на анализ, измеряется дозировочным насосом, а количество азота ротаметром при выходе из датчика. Азот предварительно осушается химическим способом. Отделяется влага от продукта в колонке.

Показывающий прибор — миллиамперметр. Анализатор непрерывного действия измеряет количество воды с достаточной высокой точностью. Датчик описанного анализатора используется для определения влагосодержания газов в том числе и природных *.

§ 8. АНАЛИЗАТОР СОДЕРЖАНИЯ СОЛЕЙ В НЕФТИ

Соли, в основном хлориды, содержатся в растворенном состоянии в воде, присутствующей в нефти, а также в виде мельчайших кристаллов непосредственно в нефти. Так же как и вода, соли являются

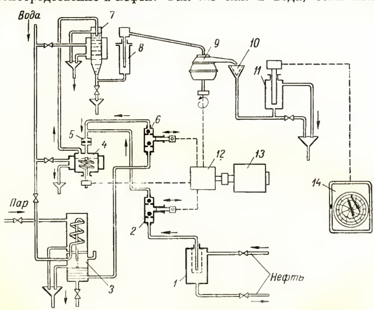


Рис. 6. 31. Укрупненная схема анализатора содержания солей в нефти.

1 — фильтр нефти; *2* и *6* — дозировочные насосы; *3* — конденсатор; *4* — смеситель механический; *5* — смеситель диафрагменный; *7* — отстойник; *8* — переточная трубка; *9* — центрифуга; *10* — бумажный фильтр; *11* — датчик; *12* — редуктор; *13* — электродвигатель; *14* — вторичный прибор.

весьма нежелательной примесью, и их по возможности удаляют из нефти перед ее переработкой. Хлористые соли (NaCl, MgCl и др.), разлагаясь при высоких температурах, выделяют хлор, который

* Разработан ВНИИГАЗ.

с водой образует соляную кислоту, вызывающую коррозию стальной аппаратуры и трубопроводов технологических установок.

Действие анализатора основано на определении солей методом электропроводности в водной вытяжке, полученной при тщательной промывке пробы нефти паровым конденсатом. При этом требуется строгая дозировка как нефти, так и конденсата (рис. 6. 31) *.

Количество нефти, требуемой для анализа, составляет 150 *мл/ч*, парового конденсата 1500 *мл/ч*. Возможен анализ и при ином количестве конденсата, например в 20 и даже в 40 раз большем, чем количество нефти. Это зависит от содержания солей в нефти. Чем оно больше, тем больше должно быть конденсата. Для контроля работы электрообезсоливающих установок анализатор солей должен иметь шкалу примерно от 10 до 200 миллиграммов солей на один литр нефти (*мг/л*).

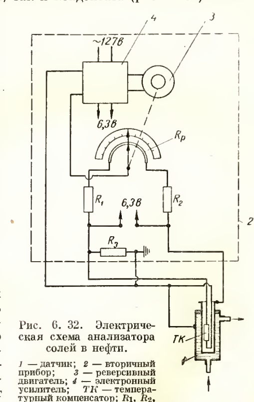


Рис. 6. 32. Электрическая схема анализатора солей в нефти.

1 — датчик; 2 — вторичный прибор; 3 — реверсивный двигатель; 4 — электронный усилитель; *ТК* — температурный компенсатор; R_1, R_2, R_3 — постоянные сопротивления; R_p — реохорд.

Дозировка подачи нефти и конденсата должна быть очень стабильной, так как от этого зависит точность показаний анализатора. Градуировка прибора ведется по водным растворам хлористого натрия известной концентрации. Точность показаний анализатора зависит также от степени отмывки солей от нефти и от чистоты водной вытяжки. Для достижения этого нефть и конденсат тщательно перемешивают в диафрагменном и механическом смесителях, затем смесь расслаивают в отстойнике и дополнительно пропускают через центрифугу. После центрифуги водную вытяжку пропускают еще через бумажный фильтр, и лишь после этого она поступает в датчик. Перемешивание и отстой протекают при температуре около 95° С.

Для компенсации температурных колебаний в электрическую схему введен температурный компенсатор в виде термосопротивле-

* Разработан СКБ АНН.

ния, расположенного внутри датчика. Датчик представляет собой металлический стакан, внутри которого расположена трубка с глухим дном. Трубка эта электрически изолирована от наружного стакана.

Электрическая схема (рис. 6. 32) является мостом сопротивления, питаемым переменным током напряжением 6,3 *в*. В одной из плеч моста включено сопротивление испытуемой водной вытяжки, заполняющей промежуток между внутренней трубкой и наружным стаканом датчика. Температурный компенсатор шунтирует мост и вносит поправку в напряжение небаланса моста соответственно колебаниям температуры раствора.

В качестве вторичного прибора используется самопишущий уравновешенный мост. Погрешность показаний анализатора около $\pm 2{,}5-3\%$ от диапазона шкалы.

§ 9. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ВЕСА ЖИДКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОТОКЕ

Удельный вес является одним из важнейших параметров, характеризующих качество получаемой продукции на нефтезаводах. Для измерения удельного веса непосредственно на технологических установках получил распространение прибор, основанный на непрерывном взвешивании U-образной горизонтальной трубки с испытуемым продуктом (рис. 6. 33) *.

Горизонтально расположенная U-образная трубка соединена с подводящими неподвижными патрубками при помощи сильфонов. Под действием веса ее свободный конец стремится опуститься. Вес трубки зависит от удельного веса протекающей через нее жидкости. Взвешивается трубка при помощи пневматического устройства. С опусканием трубки заслонка приближается к соплу. Это вызывает повышение давления воздуха на выходе из пневматического усилителя **. Давление передается и в сильфон обратной связи. Под действием обратной связи трубка поддерживается почти в одном и том же положении, причем каждому значению удельного веса жидкости соответствует строго определенное давление воздуха на выходе из усилителя. Это давление измеряется вторичным прибором, шкала которого градуируется в единицах удельного веса. Для автоматического внесения поправки на изменения удельного веса с изменением температуры служит манометрический термометр, состоящий из термобаллона и сильфона, заполненных сжатым азотом. При отклонениях температуры от 20° С, при которой тарируется прибор, термосистема воздействует через рычаг обратной связи на трубку, внося тем самым поправку. Для исключения влияния окружающей темпе-

* Разработан СКБ АНН.

** Действие усилителя описано в главе 5, рис. 5. 13.

ратуры на термосистему имеется второй компенсационный сильфон такого же объема, как и у сильфона температурной коррекции, но без термобаллона.

Прибор может измерять удельный вес в диапазоне от 0,5 до 1,2 $Г/см^3$. Путем настройки пределы шкалы прибора могут быть уста-

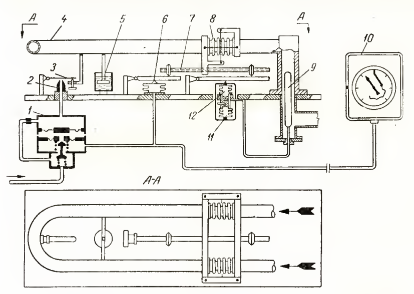


Рис. 6. 33. Схема прибора для измерения удельного веса нефтепродуктов.

1 — пневматический усилитель; *2* — сопло; *3* — заслонка; *4* — U-образная трубка; *5* — масляный демпфер; *6* — сильфон обратной связи; *7* — рычаг обратной связи; *8* — соединительный сильфон; *9* — термобаллон; *10* — вторичный прибор; *11* — компенсационный сильфон; *12* — сильфон температурной коррекции.

новлены в любом участке указанного диапазона, отличающихся на 0,05, 0,10 или 0,15 $Г/см^3$. Например, можно установить шкалу от 0,7 до 0,8 (или 0,7—0,75, или 0,7—0,85), от 0,5 до 0,6 от 1 до 1,15 и т. д.

Прибор можно применять при давлении до 10 $кГ/см^2$ и при температуре продукта до 100° С. Основная погрешность ±2% от диапазона шкалы.

§ 10. АНАЛИЗАТОР ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОТОКЕ

Температурой вспышки характеризуется качество таких продуктов, как керосин, дизельное топливо, смазочные масла, мазут, гудрон и крекинг-остаток.

Имеются анализаторы температуры вспышки, основанные на автоматизации лабораторного прибора. В них через пробоотборную систему из технологического потока периодически отбирается проба продукта в закрытый сосуд. Затем проба подогревается и над ее поверхностью через определенные интервалы времени создается электрическая искра. Температура жидкости измеряется и записывается потенциометром. При достижении температуры вспышки паровоздушная смесь над жидкостью вспыхивает, давление газов

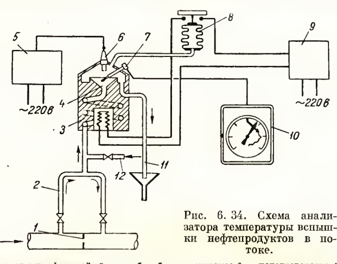


Рис. 6. 34. Схема анализатора температуры вспышки нефтепродуктов в потоке.

1 — трубопровод с диафрагмой; *2* — пробоотборная система; *3* — подогреватель; *4* — тигель; *5* — блок питания запальной свечи; *6* — запальная свеча; *7* — термопара; *8* — реле давления; *9* — блок питания нагревателя; *10* — вторичный прибор — потенциометр; *11* — сброс отработанного продукта; *12* — линия ввода сжатого воздуха.

возрастает, замыкаются контакты, электрический импульс от которых через систему выключателей и реле передается на самопишущий потенциометр. На кривой записи температуры делается отметка о вспышке. Однако такие анализаторы сложны и выдают результат измерения по отношению к моменту отбора пробы со значительным запаздыванием.

Описываемый ниже анализатор * более совершенен, непрерывного действия и менее сложен. Принцип действия этого анализатора основан на автоматическом поддержании температуры нефтепродукта, непрерывно протекающего через подогреватель, на уровне температуры вспышки (рис. 6. 34).

Для отбора пробы в технологическом трубопроводе устанавливают диафрагму, и часть продукта вследствие перепада давления непре-

* Разработан Башкирским филиалом СКБ АНН.

рывно циркулирует по пробоотборной системе. Из системы продукт направляется в подогреватель, причем по пути его смешивают с воздухом. Подогретый продукт заполняет тигель и из него по сливной трубке сбрасывается в канализацию.

Над тиглем в пространстве, заполненном паровоздушной смесью, расположены запальная свеча и термопара. В запальной свече через каждые 7,5 *сек* создается электрическая искра. Термопара подключена к самопишущему потенциометру, которым измеряется температура продукта в тигле. Когда температура продукта достигнет температуры вспышки, то при очередной искре произойдет вспышка. Мгновенное повышение давления в нагревателе через реле давления вызовет отключение электропитания нагревателя. Если при последующих искрах вспышка не произойдет, то нагреватель опять включится и т. д. Таким способом температура продукта в тигле поддерживается равной температуре его вспышки. Показания отсчитывают по шкале самопишущего потенциометра. Погрешность анализатора составляет $\pm 1-2^\circ$ C.

Подогреватель и электрические блоки монтируются в общем взрывозащищенном корпусе и образуют датчик анализатора. Датчик устанавливают на расстоянии до 10 *м* от места отбора пробы. Вторичный прибор — самопишущий электронный потенциометр, может быть отнесен от датчика на расстояние до 300 *м*. Потенциометр может быть снабжен системой пневматической передачи показаний на командный регулирующий прибор (на схеме не дано).

§ 11. АНАЛИЗАТОР ВЯЗКОСТИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОТОКЕ

Непрерывное измерение вязкости требуется при контроле качества смазочных масел на маслозаводах, крекинг-остатка на установках термического крекинга и т. п.

Задача непрерывного измерения вязкости в потоке сложна и до сих пор еще не получила полного решения. Одним из возможных способов непрерывного измерения вязкости в потоке является использование внутренних сил трения жидкости для создания вращающего момента, величина которого пропорциональна вязкости.

Анализатор * состоит из корпуса, через который непрерывно протекает жидкость, с двумя коаксиальными цилиндрами (рис. 6. 35). Один из цилиндров — двойной — вращается синхронным электродвигателем с постоянной скоростью. Другой — ведомый — свободно подвешен между стенками первого и приводится во вращение действием вязкостных сил слоя жидкости, заполняющей пространство между цилиндрами.

---

* Разработан Грозненским нефтяным институтом.

16 Заказ 1042.

Крутящий момент M, приводящий в движение ведомый цилиндр, может быть выражен уравнением

$$M = \eta \frac{w}{K}, \tag{6.20}$$

где η — вязкость жидкости;

w — угловая скорость вращения ведущего цилиндра;

K — постоянная прибора, зависящая от геометрических размеров цилиндров.

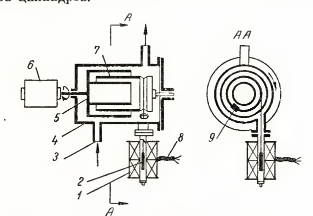


Рис. 6. 35. Схема датчика автоматического вискозиметра.

1 — индукционная катушка; 2 — железный сердечник; 3 — линия входа жидкости; 4 — корпус; 5 — вращающийя цилиндр; 6 — электродвигатель; 7 — ведомый цилиндр; 8 — электропровода к вторичному прибору; 9 — груз.

На ведомом цилиндре имеется груз для создания противодействующего момента. Угол поворота ведомого цилиндра пропорционален вязкости измеряемой жидкости. К ведомому цилиндру подвешен железный сердечник катушек дифференциально-трансформаторной системы передачи показаний. Блок с цилиндрами является датчиком анализатора. В качестве вторичного прибора используется самопишущий индукционный мост переменного тока. Шкала такого анализатора может быть отградуирована в единицах вязкости. Для поддержания требуемой температуры, например 100° С, измеряемая жидкость подогревается перед поступлением в датчик в змеевиковом подогревателе конденсатом водяного пара (на рис. 6. 35 не показан).

§ 12. АНАЛИЗАТОР КАЧЕСТВА ВЕРХНЕГО ПРОДУКТА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПО УПРУГОСТИ ПАРОВ

В некоторых процессах разделения смесей бинарных продуктов, таких, как изо- и нормальный бутаны, для контроля качества верхнего продукта ректификационной колонны применяют анализа-

торы, основанные на измерении упругости паров (рис. 6. 36). Анализатор состоит из датчика с пневматическим устройством, телепередачи и вторичного самопишущего прибора. Основным элементом является термосистема, состоящая из термобаллона и камеры *А* датчика, соединенных между собой тонкой трубкой. Термобаллон помещают над тарелкой в слой жидкости. Заполняют термобаллон на $^2/_3$ своего объема эталонной жидкостью данной тарелки, соответ-

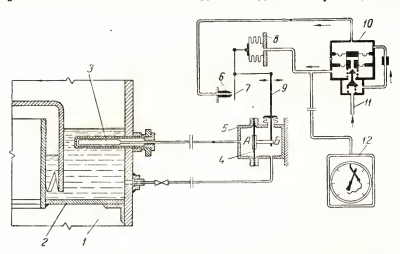


Рис. 6. 36. Схема анализатора качества верхнего продукта ректификационной колонны по упругости паров.

1 — ректификационная колонна; *2* — колпачковая тарелка; *3* — термобаллон; *4* — стальная мембрана; *5* — датчик; *6* — сопло; *7* — заслонка; *8* — сильфон обратной связи; *9* — рычаг; *10* — пневмоусилитель; *11* — линия питания сжатым воздухом 1,2 *кГ/см*^{2}; *12* — вторичный прибор.

ствующей требуемому составу верхнего продукта. Камера *Б* датчика сообщена трубкой с колонной на уровне той же тарелки. Давление паров в термосистеме будет всегда равно упругости паров требуемого продукта при данной температуре. Давление в камере *Б* равно упругости паров жидкости внутри колонны, находящейся на данной тарелке при той же температуре.

Мембрана датчика реагирует на разность упругостей паров жидкостей в колонне и эталонной. Эту разность, преобразованную в давление сжатого воздуха, записывает вторичный прибор. Оператор установки может регулировать процесс для уменьшения этой разности и тем самым поддерживать требуемое качество верхнего продукта колонны. Имеются анализаторы, которые автоматически регулируют процесс по показаниям самопишущего прибора. Для изменения задания требуется сменить жидкость, заполняющую термосистему.

§ 13. АНАЛИЗАТОР ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Качество бензинов и некоторых других продуктов, получаемых прямой переработкой нефти и крекингом, контролируют по их фракционному составу. Для этого периодически отбирают пробу продукта и в заводской лаборатории ее подвергают разгонке. Для ускорения анализа и получения возможности оператору наблюдать за фрак-

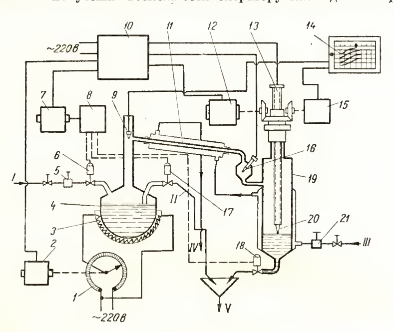


Рис. 6. 37. Схема прибора для автоматического определения фракционного состава нефтепродуктов.

1 — автотрансформатор; *2*, *7* и *12* — электродвигатели; *3* — подогреватель; *4* — колба; *5* и *21* — регулятор давления; *6*, *17* и *18* — соленоидные клапаны; *8* — датчик времени; *9* — термопара; *10* — блок управления; *11* — холодильник паров; *13* — ходовой винт; *14* — самопишущий потенциометр; *15* — блок отметок объемов; *16* — термопара начала кипения; *19* — приемник дистиллята; *20* — термоэлемент следящей системы. Линии потоков: *I* — входа нефтепродукта; *II* — выхода нефтепродукта; *III* — входа воды; IV — выхода воды; *V* — нефтепродукта в сборник.

ционным составом продуктов созданы специальные автоматические приборы, которые устанавливают непосредственно на установке. Упрощенная схема одного из таких приборов * приведена на рис. 6. 37. Принцип действия его состоит в разгонке пробы в колбе. Объем пробы, размеры колбы и холодильника паров, а также скорость разгонки приняты такими же, как и для стандартной лабораторной аппаратуры. Все операции разгонки и подготовки к ней автоматизированы

* Разработан СКБ АНН.

и через определенные промежутки времени повторяются. Проба, подвергаемая разгонке, поступает к колбе непосредственно из технологического потока.

Основными узлами прибора являются продуктовая колба *4* с подогревателем *3*, холодильник паров *11*, приемник дистиллята *19*, автотрансформатор *1*, блок управления *10*, датчик времени *8* и вторичный самопишущий прибор *14*, на диаграмме которого записывается кривая разгонки. После окончания предыдущей разгонки начинается операция промывки и заполнения колбы. Соленоидные клапаны *6* и *17* открываются, и через колбу в течение 2 *мин* пропускается испытуемый продукт. Затем по сигналу датчика времени закрывается клапан на входе. Избыток по сифонной трубке сливается, и в колбе остается ровно 100 *мл* жидкости. После этого закрывается клапан *17* на линии сброса продукта из колбы и начинается ее подогрев. На уровне выхода паров из колбы в холодильник установлена термопара *9*, которой измеряется температура в процессе разгонки. Эта температура регистрируется самопишущим потенциометром с момента начала кипения продукта в колбе до конца разгонки. Перо потенциометра до начала кипения продукта в колбе находится в приподнятом положении при помощи электромагнита (на рисунке не показан), включаемого и выключаемого блоком управления. Начало кипения определяется по изменению э. д. с. термопары *16* при попадании на нее первой капли дистиллята, вытекшей из холодильника паров. В блоке управления имеется электронный регулятор, который включается в работу тотчас же после получения сигнала о начале кипения. В этот момент перо регистратора опускается и оно начинает записывать температуру термопары *9*. Одновременно отключается термопара *16* и к электронному регулятору подключается термоэлемент *20* следящей системы.

Термоэлемент следящей системы расположен в нижней части ходового винта *13*, который в начале разгонки устанавливается автоматически в нижнее положение. Как только уровень дистиллята в приемнике *19* коснется термоэлемента следящей системы, включается двигатель *12* ходового винта и термопара начинает подниматься с определенной скоростью. Эта скорость может быть задана в соответствии с требованиями к скорости разгонки того или иного продукта. Колба продолжает подогреваться, от находящегося в ней продукта отгоняется дистиллят, который, конденсируясь в холодильнике, стекает в приемник, и уровень жидкости в последнем непрерывно повышается. Задача электронного регулятора — обеспечение такой скорости разгонки, при которой уровень будет повышаться со скоростью поднятия ходового винта. Термоэлемент следящей системы является чувствительным элементом, а его э. д. с. входной величиной регулятора.

Выходная электрическая величина регулятора управляет электродвигателем *2*, связанным с движком автотрансформатора *1*. Пере-

мещения движка изменяют напряжение обмотки подогревателя 3, а следовательно, и степень подогрева колбы.

По изменениям э. д. с. термоэлемента следящей системы можно судить о скорости разгонки. Если скорость превышает заданную, то уровень дистиллята в приемнике повышается быстрее, чем поднимается ходовой винт, и термоэлемент погружается в жидкость. При этом его э. д. с. уменьшается, что вызывает срабатывание регулятора в сторону уменьшения подогрева колбы. Если скорость мала, то термоэлемент находится над жидкостью, его э. д. с. увеличивается и регулятор срабатывает в сторону увеличения подогрева колбы. Когда скорость разгонки равна заданной, уровень дистиллята повышается со скоростью перемещения ходового винта и жидкость слегка касается термоэлемента. В этом случае э. д. с. термоэлемента

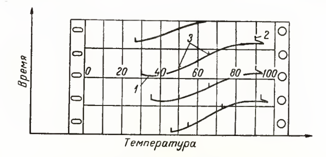


Рис. 6. 38. Образец записи кривых разгонки.
1 — точка начала кипения; 2 — точка конца кипения; 3 — точка 30 и 50 % отгона.

имеет среднее значение и регулятор не изменяет степени подогрева колбы.

Конец разгонки обнаруживается по падению температуры паров на выходе из колбы. Перо регистратора начинает перемещаться влево и замыкает контакт «окончание разгонки». В результате элементы схемы блока управления переключаются снова на цикл «подготовки» и весь процесс повторяется. Полный цикл разгонки светлых нефтепродуктов составляет 30—40 *мин*. Прибор имеет механизм для нанесения на кривую разгонки отметок объема отогнанного дистиллята. Этот механизм связан с ходовым винтом, по перемещениям которого можно судить о степени наполнения приемника. Образец кривых разгонок, записываемых на диаграмму прибора, приведен на рис. 6. 38.

Схема монтажа анализатора приведена на рис. 6. 39. Монтируют прибор в специальном помещении вблизи технологического трубопровода, по которому протекает нефтепродукт, подлежащий анализу. В трубопровод устанавливают диафрагму для создания перепада

давления, под действием которого часть продукта направляется по трубкам в холодильник и фильтр, а затем возвращается в трубопро-

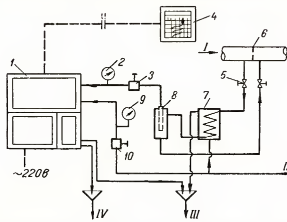


Рис. 6. 39. Схема монтажа прибора для автоматического определения фракционного состава нефтепродуктов.

1 — прибор для определения фракционного состава; 2 и 9 — манометры; 3 и 10 — регуляторы давления; 4 — самопишущий прибор; 5 — вентиль; 6 — диафрагма; 7 — холодильник; 8 — фильтр.
Линии потоков: I — нефтепродукта; II — воды; III — воды в канализацию; IV — нефтепродукта в сборник.

вод. Проба, поступающая на анализ, отбирается через фильтр и через регулятор давления направляется в прибор. Отработанный продукт течет в сборник (на рисунке не показан).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлеманс А. Хроматография газов. ИЛ, 1959.
2. Байэр Э. Хроматография газов. ИЛ, 1961.
3. Тарасов А. И. Газы нефтепереработки и методы их анализа. Гостоптехиздат, 1960.
4. Фроловский П. А. Лабораторный хроматограф ХЛ-3. Химия и технология топлив и масел, № 7, 1961.
5. Тарасов А. И., Лулова Н. И., Кудрявцева Н. А., Земскова Е. И. Хроматографический газоанализатор для анализа газов нефтепереработки. Газовая хроматография (Труды Первой Всесоюзной конференции). Изд. АН СССР, 1960.
6. Фесенко Б. П., Дацкевич А. А., Андерс В. Р. Приборы и установки по газовой хроматографии. Газовая хроматография. (Труды Первой Всесоюзной конференции.) Изд. АН СССР, 1960.
7. Дацкевич А. А. Хроматографические газоанализаторы. Сборник «Автоматические газоанализаторы». ЦИНТИЭлектропром, 1961.
8. Александров С. Н., Бугель В. И., Чистоpазум С. А. Инфракрасный спектрометр для аналитических целей. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института химической переработки газов (ХИМГАЗ), вып. VI. Гостоптехиздат, 1951.

9. Чулановский В. М. Введение в молекулярный спектральный анализ. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1961.
10. Рик Г. Р. Масс-спектрометрия. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953.
11. Трофимов А. В. Масс-спектральный изотопный и газовый анализ. Журнал аналитической химии, V, 1950.
12. Орлов В. А. Автоматические газоанализаторы. Госэнергоиздат, 1950.
13. Теплоэнергетические производственные приборы и регуляторы, вып. 1, ЛОНИТОПрибор. Машгиз, 1953.
14. Теплоэнергетические и химико-технологические приборы и регуляторы под редакцией П. П. Кремлевского. Машгиз, 1961.
15. Виноградова Е. Н. Методы определения концентрации водородных ионов. Изд. Московского университета, 1950.
16. Белозерский С. С., Фроловский П. А., Денисов С. С., Андерс В. Р. Методы и приборы для измерения pH в нефтяной промышленности. Гостоптехиздат, 1953.
17. Денисов С. С. Электронные приборы контроля и автоматизации нефтехимических производств. Гостоптехиздат, 1960.
18. Ганцевич И. Б., Ремнев В. Ф. Анализатор содержания воды и нефти. Химия и технология топлив и масел, № 3, 1959.
19. Analysis of water in Jet Fuels. Michael Czuha and Kenneth W. Gordoner, Instruments and Control Systems, v. 34, November 1961, No. 11.
20. Андрес В. Р., Нестеров Б. А., Пикельнер Г. А., Варфломеева Е. М., Карпаносова Р. М. Прибор для непрерывного определения содержания солей в обессоленной нефти. Химия и технология топлив и масел, № 3, 1959.
21. Вихман М. Е., Гойхман С. Я. Датчик для измерения удельного веса жидкости на потоке. Тематический научно-технический сборник. КИП для нефтяной и газовой промышленности. Серия «Нефтяное оборудование и средства автоматизации». ГОСИНТИ, 1961.
22. Покровский Б. А. и Сабитов Х. К. Анализатор температуры вспышки нефтепродуктов. Новости нефтяной техники. Нефтепереработка и нефтехимия. ГОСИНТИ, 1961.
23. Геллер З. И., Судаков П. Е., Расторгуев Ю. Л. Измерение и регулирование вязкости нефтепродуктов в потоке. Химия и технология топлив и масел, № 3, 1959.
24. Бакуткин А. Б., Попов А. А. Автоматизация в нефтеперерабатывающей промышленности. ЦНИИТЭНЕФТЬ, 1956.
25. Альховский М. С., Лисагор М. С., Каешков Д. И. Прибор для автоматического определения фракционного состава нефтепродуктов в потоке. Химия и технология топлив и масел, № 3, 1961.

ГЛАВА 7

ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

§ 1. ЗАДАЧА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ

Задачей автоматического регулирования является поддержание какой-либо величины (температуры, давления, расхода и т. п.) на заданном значении без вмешательства человека. На рис. 7. 1 изображена схема регулирования температуры нефти на выходе из трубчатой печи.

Объектом, в котором осуществляется процесс регулирования, является печь со змеевиком из труб, по которым прокачивается насосом (на рис. 7. 1 не показан) нефть. Регулируемой величиной является температура нефти на выходе из печи, измеряемая термопарой *6* и прибором *4*. Прибор имеет устройство, в котором измеряемая температура преобразовывается в командный сигнал сжатого воздуха. Это сигнал по линии связи *3* передается регулирующему клапану *2*. Последний установлен на линии подачи топливного газа в печь.

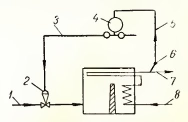


Рис. 7. 1. Схема регулирования температуры нефти на выходе из печи.

1 — линия топливного газа; *2* — регулирующий клапан; *3* и *5* — линии связи; *4* — регулирующий прибор; *6* — термопара; *7* — линия выхода нефти; *8* — линия входа нефти.

Процесс регулирования протекает так. Когда при уменьшении подачи нефти в змеевик печи температура нефти на выходе повысится относительно заданного значения, то регулирующий прибор выдаст команду на прикрытие клапана, подача газа в печь уменьшится и через некоторое время температура нефти понизится до заданного значения. Если от увеличения подачи нефти в змеевик ее температура на выходе понизится, то регулятор выдаст команду на открытие клапана, подача газа увеличится и температура нефти снова повысится.

Если допустить, что изменений в подаче нефти не будет, то как будто бы должно наступить равновесное состояние между притоком тепла в печь и его расходом и температура на выходе из печи не должна изменяться. Но в практике такого состояния равновесия или не бывает или оно продолжается всего лишь в течение сравнительно короткого промежутка времени. Температура нефти на выходе из печи может изменяться и по ряду других причин: от изменения температуры нефти, поступающей в змеевик; от изменения теплотворной способности топливного газа; от неравномерной подачи воздуха в топку печи; от колебаний окружающей температуры; от загрязнения стенок труб и других причин.

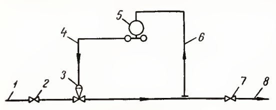


Рис. 7. 2. Схема регулирования давления газа в газопроводе.

1 — линия входа газа; *2* и *7* — задвижки; *3* — регулирующий клапан; *4* и *6* — линии связи; *5* — регулирующий прибор; *8* — линия выхода газа.

Стабилизировать все факторы, влияющие на температуру нефти на выходе из печи, практически невозможно. Это обстоятельство и вызывает необходимость применять регулятор.

Факторы, вызывающие отклонение регулируемой температуры от заданного значения, называются возмущениями. Печь рассчитывают на определенную нагрузку или производительность по количеству тепла, передаваемого нефти в единицу времени для достижения заданной температуры на выходе. Нагрузка печи может увеличиться или уменьшиться относительно расчетной, например, от изменения подачи нефти в змеевик. Если количество нефти увеличить, то для поддержания ее температуры на выходе на прежнем значении потребуется больше тепла и, следовательно, нагрузка печи увеличится. При уменьшении подачи нефти нагрузка понизится.

Нагрузка печи может изменяться и от величины заданного значения температуры нефти на выходе. Если при постоянной подаче повысить или понизить заданную температуру нагрева нефти, то нагрузка в первом случае увеличится и во втором уменьшится.

Аналогично протекает процесс регулирования и других величин в различных технологических аппаратах. На рис. 7. 2 показана схема регулирования давления в газопроводе. Здесь объектом, в котором протекает процесс регулирования, является участок газопровода небольшой протяженности между регулирующим клапаном *3* и задвижкой *7*. Регулируемой величиной является давление газа в газопроводе после клапана *3*, измеряемое регулирующим прибором *5*. Нагрузкой данного объекта является количество газа, которое должно пройти через газопровод, расходуемого какими-либо потребителями (например, населенным пунктом на бытовые нужды, промы-

шленным объектом и т. н.). При нормальной постоянной нагрузке через регулирующий клапан протекает определенное количество газа и давление после него равно заданному. От увеличения или уменьшения потребления газа давление после клапана будет соответственно уменьшаться или увеличиваться. Задача регулятора состоит в поддержании этого давления постоянным. При повышении регулируемого давления регулирующий прибор прикроет клапан, а при понижении — откроет.

По технологическому процессу схемы, изображенные на рисунках 7. 1 и 7. 2, различны, но в части регулирования они совершенно одинаковы и могут быть заменены одной схемой (рис. 7. 3), которая называется структурной схемой системы автоматического регулирования. Имея такую схему, показывающую принцип действия всей системы в целом, можно установить более общую терминологию.

Рис. 7. 3. Структурная схема системы регулирования.

А — объект регулирования; *Б* — автоматический регулятор; *1* — чувствительный элемент; *2* — измерительное устройство; *3* — регулирующее устройство; *4* — привод исполнительного механизма.

1. Объектом регулирования называется технологический аппарат, машина, агрегат и т. п., в котором осуществляется процесс регулирования.

2. Регулируемой величиной или регулируемым параметром называется какая-либо величина (температура, давление, расход, число оборотов, уровень жидкости и т. п.), постоянное заданное значение которой должен поддерживать регулятор.

3. Регулирующим воздействием называется воздействие на объект регулирования со стороны регулятора, осуществляемое исполнительным механизмом.

4. Автоматическим регулятором называется прибор или совокупность приборов, при помощи которых автоматически поддерживается заданное значение регулируемой величины.

Автоматический регулятор содержит измерительную часть, регулирующую часть и исполнительный механизм. Измерительная часть служит для измерения регулируемой величины. Она состоит из чувствительного элемента (термопары, термометра сопротивления, диафрагмы расходомера и т. п.), непосредственно воспринимающего измеряемую величину, и из реагирующего элемента (гальванометра, дифманометра, манометра и т. п.). Реагирующий элемент обычно снабжается указателем и шкалой для взятия отсчета. Существуют

измерительные устройства, у которых реагирующий элемент не имеет указателя и шкалы.

В регулирующей части измеряемая величина преобразовывается в пропорциональную ей величину какого-либо вида энергии (электрической, энергии сжатого воздуха или жидкости) или в механические перемещения, воздействующие на исполнительный механизм. Передается эта энергия по линии связи (электрическим проводам, трубкам) или при помощи механических тяг.

В регулирующем устройстве имеется механизм для настройки задания регулятора. Измерительная и регулирующие части могут быть заключены в общий корпус; в этом случае они образуют отдельный прибор, называемый командным. Но они могут быть выполнены и в виде отдельных приборов или блоков. В первом случае связь между измерительной и регулирующей частями механическая, во втором случае может быть электрической или пневматической.

В регуляторах некоторых видов регулирующая часть в виде отдельного устройства отсутствует и исполнительный механизм управляется энергией регулируемой среды через реагирующий элемент. Такие регуляторы не имеют командного прибора.

Исполнительный механизм служит для передачи регулирующего воздействия объекту регулирования и состоит из приводной части и регулирующего органа. Приводная часть может быть выполнена в виде электродвигателя, пневматического или гидравлического устройства мембранного или поршневого типа. Регулирующий орган может быть электрическим рубильником, вентилем, задвижкой, заслонкой, устанавливаемыми на трубопроводе, по которому протекает газ, пар или жидкость. В нефтепереработке чаще всего применяют клапаны, вентили, задвижки и заслонки с пневматическим мембранным приводом.

Составные части схемы (рис. 7. 3), обозначенные квадратами: объект регулирования, чувствительный элемент, измерительное устройство, регулирующее устройство и исполнительный механизм, являются элементами структурной схемы. Стрелки на линиях, соединяющих отдельные элементы между собой, показывают направленность их действия.

Элементы *1*, *2*, *3* и *4* входят в состав автоматического регулятора (очерчены пунктиром).

Каждый элемент характеризуется входной и выходной величинами. На рис. 7. 3 входная величина объекта регулирования обозначена через $x_{вх}$, а выходная $x_{вых}$. Обозначений входных и выходных величин других элементов не приведено.

Для системы регулирования температуры нефти, подогреваемой в печи (см. рис. 7. 1), входной величиной объекта при постоянстве поступления сырья являются изменения в подаче топливного газа в топку печи, а выходной — температура нефти. Для системы регулирования давления (рис. 7. 2) входной и выходной величинами объ-

екта соответственно будут изменения расхода газа и его давление в газопроводе после регулирующего клапана. Из рис. 7. 3 видно, что приведенная система автоматического регулирования замкнута. В ней выходная величина предыдущего элемента является входной для последующего. Элементы имеют направленное действие. Это означает, что воздействие со стороны одного элемента на другой может передаваться только в одном направлении.

На схеме рис. 7. 3 показаны два воздействия на систему регулирования, которые называются внешними: возмущающее воздействие от изменения нагрузки объекта и настройка задания. Эти два воздействия входят в число возмущений, которые вносятся в систему регулирования извне.

Выходной регулируемой величине объекта задается определенное значение, и задача регулятора — поддержание ее на этом уровне. Регулируемая величина измеряется прибором и сравнивается с заданной величиной. Причиной, вызывающей воздействие регулятора на объект, является разность между действительной в данный момент времени и заданной регулируемой величиной. Эта разность называется рассогласованием, отклонением, а иногда ошибкой. Можно построить структурную схему для отдельно взятого объекта регулирования или регулятора. В этом случае схема будет разомкнута, так как ее последний элемент не имеет непосредственной связи с первым. Пример разомкнутой структурной схемы регулятора приведен на рис. 7. 4; в ней элементы и их воздействие друг на друга соответствуют элементам регулятора, входящего в структурную схему системы регулирования, приведенной на рис. 7. 3.

Система, изображенная на рис. 7. 3, называется еще одноконтурной. В ней элементы соединены между собой связями, образующими только один контур. Существуют многоконтурные системы, в которых элементы соединены между собой так, что их связи образуют два контура и более. Примеры таких систем рассматриваются в § 9.

При изучении систем автоматического регулирования различают два их состояния — динамическое равновесие, когда регулируемая величина имеет постоянное значение, и переходный процесс, при котором регулируемая величина изменяется во времени. В различных по своему конструктивному исполнению элементах структурных схем могут протекать одинаковые по своему характеру переходные процессы. В связи с этим при исследовании динамики систем автоматического регулирования элементы структурных схем заменяются одним или несколькими типовыми или элементарными звеньями, различающимися между собой только видом дифференциального уравнения, описывающего их переходный процесс.

При дальнейшем ознакомлении с элементами теории автоматического регулирования все звенья структурных схем рассматриваются как линейные, т. е. такими, у которых зависимость выходной величины от входной при установившемся состоянии линейна, и переходные

процессы, протекающие в них, описываются линейными дифференциальными уравнениями.

В действительности в большинстве реальных звеньев переходные процессы нелинейны. Но так как рассматриваемые отклонения величин от их равновесных значений в процессах регулирования

Рис. 7. 4. Структурная схема регулятора.

1 — чувствительный элемент; 2 — измерительное устройство; 3 — регулирующее устройство; 4 — привод исполнительного механизма.

невелики, допущение линейности не приводит к большим погрешностям. Методы оценки процессов, протекающих в звеньях и в системе регулирования, если считать их линейными, дают результаты во многих случаях вполне пригодные для практического применения.

§ 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

При изучении систем автоматического регулирования необходимо знать, как изменяется во времени выходная величина объекта регулирования при изменении входной величины. Этот переходный процесс может закончиться новым постоянным значением, но может привести и к незатухающим колебаниям или даже ко все возрастающему отклонению выходной величины.

Переходные процессы имеют место и в каждом отдельно взятом звене системы. Очень важно составить систему из таких звеньев, которые обеспечат лучшее поддержание регулируемой величины на заданном значении.

При составлении структурной схемы регулятора необходимо также подобрать такие звенья, которые обеспечат требуемый закон изменения выходной величины. Различаются звенья по характеру переходного процесса, свойственного каждому из них.

Переходные процессы, протекающие в отдельных звеньях и в системах, отражают их динамические свойства — поведение выходной величины в движение при изменении входной величины. Зависимость изменения во времени выходной величины от изменения входной величины линейного звена в общем виде описывается линейным дифференциальным уравнением

$$a_n x_{вых}^{n} + a_{n-1} x_{вых}^{n-1} + \ldots + a_1 x_{вых}' + a_0 x_{вых} = b_k x_{вх}^{k} + b_{k-1} x_{вх}^{k-1} + \ldots + b_1 x_{вх}' + b_0 x_{вх}, \qquad (7.1)$$

где $x_{вых}$ — выходная величина;

$x_{вх}$ — входная величина;

$a_n, a_{n-1}, \ldots, a_0, b_k, b_{k-1}, \ldots, b_0$ — постоянные коэффициенты;
$n, n-1, k, k-1, \ldots$ — коэффициенты, показывающие порядок производных;
$x'_{вых}$ и $x'_{вх}$ — первые производные от $x_{вых}$ и $x_{вх}$.

В дальнейшем изложении будет применяться также запись дифференциальных уравнений в операторной форме, применяя символы:
для дифференцирования

$$\frac{d}{dt}=p, \quad \frac{d^2}{dt^2}=p^2 \text{ и т. д.}$$

для интегрирования

$$\int_0^t dt=\frac{1}{p}.$$

p — называется оператором; t — время.

Используя это, дифференциальное уравнение (7.1) можно написать в следующем виде:

$$(a_n p^n + a_{n-1}p^{n-1}+\ldots+a_1 p+a_0)\, x_{вых}=$$
$$=(b_k p^k + b_{k-1}p^{k-1}+\ldots+b_1 p+b_0)\, x_{вх}. \tag{7.2}$$

Операторная форма записи введена здесь не с целью интегрирования уравнений методами операторного исчисления, а лишь для упрощения.

Правая часть уравнения характеризует величины на входе звена, а левая выражает изменения выходной величины звена или переходный процесс. Если в правой части уравнения нет членов, содержащих p, то звенья, описываемые такими уравнениями, называются простыми. Если же в правой части содержится член с p, то такие звенья называются дифференцирующими, так как в них выходная величина зависит не только от входной величины, но и от ее производных.

Для оценки звеньев систем регулирования по их переходным процессам принято обычно изменять входную величину скачкообразно в виде единичной функции

$$x_{вх}(t)=|1|. \tag{7.3}$$

До начала такого изменения или возмущения входная и выходная величины имеют постоянные значения. В момент времени $t=0$ входная величина изменяется скачкообразно на конечную величину, принимаемую равной единице. Затем в течение всего времени при любых значениях $t>0$ входная величина больше не изменяется. Выходная величина после нанесения такого возмущения изменяется. Решение уравнения (7 2) при $x_{вх}=|1|$ дает функцию $x_{вых}(t)$, выражающую закон изменения выходной величины, которая назы-

вается переходной функцией или временной характеристикой звена. Графическое изображение переходной функции при нанесении единичного возмущения приведено на рис. 7. 5.

Отношение выходной величины к входной величине в установившемся режиме

$$k=\left(\frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}}\right)_{t\to\infty} \tag{7.4}$$

называется коэффициентом усиления или передаточным коэффициентом звена. Он определяет наклон статической характеристики линейного звена. Статической характеристикой называется зависимость выходной величины от входной при установившихся значениях.

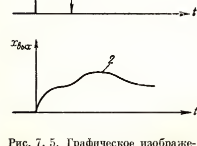


Рис. 7. 5. Графическое изображение переходной функции при единичном возмущении входной величины.

1 — изменение входной величины; 2 — изменение выходной величины.

Коэффициент усиления может быть безразмерной и размерной величиной в зависимости от того, имеют ли одинаковые или неодинаковые размерности входная и выходная величины звена.

Для исследования свойств звеньев и их оценки большое распространение получил также частотный метод. При этом методе на вход звена подается возмущение в виде гармонических колебаний какой-либо величины. Если звено линейное и устойчиво, то на выходе звена через некоторое время после начала возмущения на входе установятся гармонические колебания с такой же частотой. Колебания на выходе в зависимости от вида звена могут отличаться по амплитуде и по фазе от колебаний на входе.

Устойчивым звеном называется такое, у которого выходная величина после устранения возмущения, нарушившего равновесие, снова возвращается к прежнему или новому состоянию равновесия.

Особенность частотного метода в том, что на вход звена подаются колебания не одной, а разных частот и определяют при этом, как изменяются амплитуда и фаза колебаний на выходе относительно амплитуды и фазы колебаний на входе. Зависимости эти характерны для каждого вида звеньев.

В теории регулирования широко используется комплексная форма записи колебательных процессов. Поданное на вход звена гармоническое колебание

$$X_{\text{вх}}=X_{\text{вх}\,0}\sin\omega_1 t \tag{7.5}$$

заменяют выражением в комплексной показательной форме:

$$X_{вх} = X_{вх\,0}\, e^{j\omega_1 t}, \qquad (7.6)$$

где $X_{вх\,0}$ — амплитуда колебаний на входе;
e — основание натуральных логарифмов;
j — символ, обозначающий $+\sqrt{-1}$;
w_1 — круговая частота;
t — время.

Колебания на выходе звена $x_{вых}$, отличающиеся по амплитуде и сдвигом по фазе, в обычной форме записи имеют вид:

$$X_{вых} = X_{вых\,0} \sin (w_1 t + \theta), \qquad (7.7)$$

где $X_{вых}$ — амплитуда колебаний на выходе, θ — угол сдвига фазы, или в комплексной показательной форме

$$X_{вых} = X_{вых\,0}\, e^{j(\omega_1 t + \theta)}. \qquad (7.8)$$

Такая форма записи имеет ряд преимуществ и помогает решать практические задачи. Известно, что комплексное число $\alpha + j\,\beta$ можно представить графически на комплексной плоскости в виде вектора (рис. 7. 6). Модуль вектора M комплексного числа есть расстояние от начала координат до конца вектора:

$$M = +\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}. \qquad (7.9)$$



Рис. 7. 6. Изображение комплексного числа на плоскости.

jIm (ω) — мнимая ось; Re (ω) — вещественная ось координат.

Аргумент θ, или фаза — угол между положительным направлением вещественной оси и отрезком, соединяющим начало координат с концом вектора, равен

$$\theta = \operatorname{arc\,tg} \frac{\beta}{\alpha}. \qquad (7.10)$$

Положительные углы откладываются против, а отрицательные по часовой стрелке от положительного направления вещественной оси.

Комплексное число в показательной форме имеет вид:

$$\alpha + j\beta = M e^{j\theta} \qquad (7.11)$$

или

$$\alpha + j\beta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}\; e^{j \operatorname{arc\,tg} \frac{\beta}{\alpha}}. \qquad (7.12)$$

Разделив уравнение (7.8) на уравнение (7.6), получим комплексное число

$$W(j\omega) = \frac{X_{вых\,0}\, e^{j(\omega_1 t + \theta)}}{X_{вх\,0}\, e^{j\omega_1 t}} = \frac{X_{вых\,0}}{X_{вх\,0}}\, e^{j\theta}. \qquad (7.13)$$

17 Заказ 1042.

Если на вход звена подаются гармонические колебания с амплитудой, равной единице ($X_{\text{вх}\,0} = 1$), то обозначив $X_{\text{вых}\,0} = A(\omega)$, получим выражение для комплексного числа $W(j\omega)$:

$$W(j\omega) = A(\omega)\,e^{j\theta}. \tag{7.14}$$

На комплексной плоскости комплексное число $W(j\omega)$ изобразится вектором с модулем $A(\omega)$ и аргументом θ (рис. 7. 7). Угол сдвига фаз θ откладывают по часовой стрелке от вещественной оси, что говорит об отставании колебаний на выходе по фазе от колебаний на входе. Если теперь на вход звена подать другие колебания с той же амплитудой, но с частотой $\omega = \omega_2$, большей чем ω_1, то на выходе колебания будет та же частота, но угол сдвига фаз увеличится до θ_1. По уравнению (7. 13) получим новый вектор ($\omega = \omega_2$). Таким же способом можно построить изображение вектора для любых частот от 0 до ∞. Кривая линия, описываемая концом вектора $W(j\omega)$ (рис. 7. 7) при изменении частот от 0 до ∞, называется амплитудно-фазовой частотной характеристикой или сокращенно амплитудно-фазовой характеристикой.

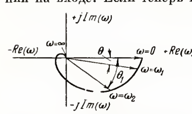


Рис. 7. 7. Амплитудно-фазовая характеристика.

Свойства звеньев оцениваются еще амплитудно-частотной характеристикой

$$A(\omega) = f_1(\omega), \tag{7.15}$$

показывающей зависимость амплитуды колебаний на выходе от частоты колебаний на входе, и фазовой частотной характеристикой

$$\theta(\omega) = f_2(\omega), \tag{7.16}$$

показывающей зависимость угла сдвига фаз колебаний на выходе звена от частоты колебаний на входе.

Весьма важной характеристикой является передаточная функция, которая отражает динамические свойства звеньев.

Передаточную функцию $W(p)$ определяют из отношения функции от оператора p, стоящей множителем перед $x_{\text{вх}}$, к функции от оператора p, стоящей множителем перед $x_{\text{вых}}$ дифференциального уравнения переходного процесса [см. уравнение (7. 2)] *:

$$W(p) = \frac{b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \ldots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0}. \tag{7.17}$$

* Доказательство этого определения приводится в курсах по теории автоматического регулирования как результат применения преобразования Лапласа к уравнению (7. 2).

Многочлен, находящийся в знаменателе, называется собственным оператором звена, а многочлен в числителе — оператором воздействия на звено. Согласно принятому определению для $W(p)$ и уравнению (7. 2) получаем важную зависимость между выходной и входной величинами звена, выраженную через передаточную функцию:

$$x_{\text{вых}} = W(p)\, x_{\text{вх}}. \qquad (7.18)$$

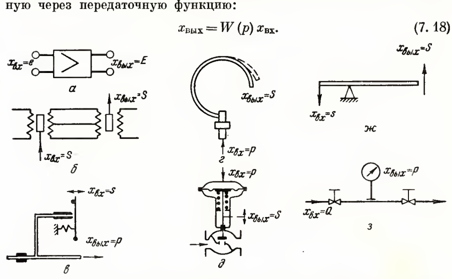


Рис. 7. 8. Примеры звеньев нулевого порядка.

а — электронный усилитель; б — индукционный датчик; в — сопло и заслонка; г — манометрическая пружина; д — исполнительный механизм при небольшой скорости перемещения; ж — рычаг; з — участок трубопровода с потоком жидкости; e и E — напряжение электрического тока; s и S — перемещения; p — давление.

Частное значение передаточной функции для $p = j\omega$

$$W(j\omega) = \frac{b_k (j\omega)^k + b_{k-1} (j\omega)^{k-1} + \ldots + b_1 j\omega + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \ldots + a_1 j\omega + a^0} = A(\omega)\, e^{j\theta} \qquad (7.19)$$

представляет аналитическое выражение амплитудно-фазовой характеристики.

В этом выражении вектора [как и в уравнении (7.13)] модуль $A(\omega)$ есть отношение амплитуд колебаний на выходе и входе звена, а аргумент — угол сдвига фаз θ между колебаниями на выходе и входе.

§ 3. ТИПОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЗВЕНЬЯ

Звенья систем регулирования и автоматических регуляторов подразделяют на несколько типов в зависимости от порядка и характера дифференциальных уравнений, описывающих их переходный процесс.

Простые звенья, дифференциальные уравнения которых не содержат в правой части члена с p, делятся на звенья нулевого, первого и второго порядков.

Звено нулевого порядка описывается уравнением

$$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}. \tag{7.20}$$

Выходная величина изменяется пропорционально изменениям входной. Такие звенья показаны на рис. 7. 8.

Коэффициент усиления звена равен k.

Переходная функция звена при $x_{\text{вх}} = 1$.

$$x_{\text{вых}}(t) = k. \tag{7.21}$$

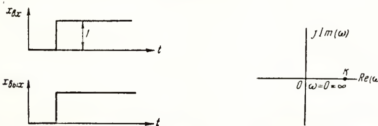


Рис. 7. 9. Переходная функция звена нулевого порядка.

Рис. 7. 10. Амплитудно-фазовая характеристика звена нулевого порядка.

Графическое изображение переходной функции приведено на рис. 7. 9.

Передаточная функция звена

$$W(p) = k. \tag{7.22}$$

Амплитудно-фазовая характеристика

$$W(j\omega) = k. \tag{7.23}$$

Ее графическое изображение (рис. 7. 10) имеет вид точки, расположенной на положительной ветви вещественной оси на расстоянии K от начала координат. Амплитуда колебаний на выходе не зависит от частоты колебаний, поданных на вход звена, и отличается от амплитуды входных колебаний в k раз.

Звено нулевого порядка называется еще пропорциональным, усилительным и безынерционным. Однако такое звено нулевого порядка является идеальным. В действительности все реальные звенья инерционны. К звеньям нулевого порядка относят лишь такие, у которых инерционность очень мала и ею можно пренебречь.

Звено первого порядка: его свойства описываются уравнением

$$T\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}} \tag{7.24}$$

или в операторной форме

$$(Tp+1)\,x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}. \qquad (7.25)$$

В этих уравнениях величина T имеет размерность времени и называется постоянной времени звена.

Характерным для этого звена является то, что при скачкообразном изменении входной величины выходная величина изменяется по экспоненту и стремится к новому установившемуся состоянию. Звено первого порядка называется еще инерционным, одноемкостным и апериодическим.

Решение дифференциального уравнения (7.24) при постоянном $x_{\text{вх}}$ и нулевых начальных условиях ($t = 0$, $x_{\text{вых}} = 0$) дает

$$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \qquad (7.26)$$

Переходная функция звена при $x_{\text{вх}} = [1]$

$$x_{\text{вых}}(t) = k\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \qquad (7.27)$$

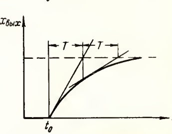


Рис. 7. 11. График переходной функции звена первого порядка.

Графическое изображение переходной функции показано на рис. 7.11. Постоянная времени T на графике переходной функции определяется как величина проекции отрезка касательной на линию нового равновесного значения выходной величины, причем для всех точек кривой T одинаково. Постоянная времени характеризует инерционность звена. Чем больше T, тем инерционнее звено, больше требуется времени для приближения выходной величины к новому равновесному состоянию, тем положе кривая переходной функции. Из уравнения (7.26) следует, что нового равновесного состояния выходная величина может достичь лишь через время $t = \infty$. Но поскольку кривая переходной функции приближается асимптотически к значению нового равновесного состояния, то практически время переходного процесса можно считать равным $3T$.

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1}. \qquad (7.28)$$

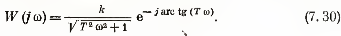
Амплитудно-фазовая характеристика звена

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega+1}. \qquad (7.29)$$

Для придания этому комплексному числу вида $\alpha + j\beta$ умножаем числитель и знаменатель на число, сопряженное комплексному числу в знаменателе, и получаем

$$W(j\omega) = \frac{k(-Tj\omega + 1)}{(Tj\omega + 1)(-Tj\omega + 1)} = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1} - j\frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}.$$

Амплитудно-фазовая характеристика звена в показательной форме из (7. 14) будет



$$W(j\omega) = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} e^{-j \operatorname{arc\,tg}(T\omega)}. \qquad (7.30)$$

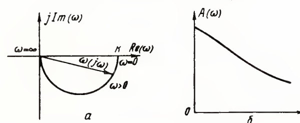


Рис. 7. 12. Амплитудно-фазовая (*а*) и амплитудно-частотная (*б*) характеристики звена первого порядка.

Амплитудно-фазовой характеристикой (рис. 7. 12, *а*) звена является полуокружность диаметром k.

Амплитуда колебаний на выходе уменьшается с увеличением частоты. Сдвиг фаз при малых частотах мал, но с увеличением частоты увеличивается. При высоких частотах колебания на выходе отстают по фазе от входных на $\frac{\pi}{2}$.

Примеры звеньев первого порядка показаны на рис. 7. 13.

З в е н ь я в т о р о г о п о р я д к а; их свойства описываются уравнением

$$T_0^2 \frac{d^2 x_{\text{вых}}}{dt^2} + T\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}} \qquad (7.31)$$

или в операторной форме

$$(T_0^2 p^2 + Tp + 1)\, x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}. \qquad (7.32)$$

В этих уравнениях T_0 и T имеют размерность времени и называются постоянными времени.

Решается уравнение (7. 31) при помощи характеристического уравнения

$$T_0^2 r^2 + Tr + 1 = 0, \qquad (7.33)$$

корни которого определяются по формуле

$$r_{1,2} = \frac{-T \pm \sqrt{T^2 - 4T_0^2}}{2T_0^2}. \qquad (7.34)$$

Динамические свойства звена определяют по значениям корней характеристического уравнения. Если корни комплексные, то переходный процесс имеет колебательный характер, если же корни действительные и отрицательные, переходный процесс протекает без колебаний.

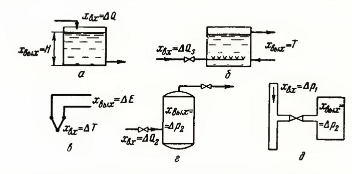


Рис. 7. 13. Примеры звеньев первого порядка.

а — бак с жидкостью со свободным сливом; *б* — теплообменник смешения; *в* — термопара; *г* — аккумулятор сжатого воздуха или газа; *д* — буферная емкость для газа или воздуха; Q — расход; H — высота уровня; T — температура; p — давление; E — э. д. с. термопары.

1-й случай. Характеристическое уравнение (7. 33) имеет комплексные корни, если

$$T^2 - 4T_0^2 < 0 \text{ или } T < 2T_0,$$

равные

$$r_1 = -\alpha + j\omega \quad \text{и} \quad r_2 = -\alpha - j\omega.$$

Из (7. 34) имеем

$$\alpha = \frac{T}{2T_0^2} \qquad (7.35)$$

и

$$\omega = \frac{\sqrt{4T_0^2 - T}}{2T_0^2} = \frac{1}{T_0}\sqrt{1 - \frac{T^2}{4T_0^2}}, \qquad (7.36)$$

где α — коэффициент затухания;

ω — угловая частота колебаний.

Уравнение (7. 31) для $x_{вх} = [1]$ является переходной функцией звена, и его решение дает

$$x_{вых}(t) = k\left[1 - e^{-\alpha t}\left(\cos\omega t + \frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t\right)\right]. \qquad (7.37)$$

Такое звено называется колебательным. График переходной функции колебательного звена приведен на рис. 7. 14. Амплитуда колебаний затухает по закону экспоненты (показано пунктиром). Установившееся состояние при $t = \infty$ соответствует величине k.

Величина, обратная α, есть постоянная времени T_0 экспоненты затухания

$$T_1 = \frac{1}{\alpha} = \frac{2T_0^2}{T}. \tag{7.38}$$

Если оставить величину T неизменной, то при увеличении T_0 постоянная времени T_1 увеличится. Следовательно, колебания будут продолжаться дольше. Если же оставить постоянным T_0, а увеличить T, то T_1 будет уменьшаться и колебания будут затухать быстрее. Поэтому постоянная T в уравнении (7. 31) характеризует демпфирование колебаний выходной величины, а постоянная T_0 — их раскачивание.

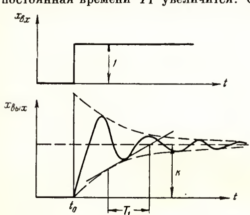


Рис. 7. 14. График переходной функции звена второго порядка.

Некоторые колебательные звенья приведены на рис. 7. 15. К ним относятся также подвижные системы магнитоэлектрических приборов (рамка гальванометра со стрелкой), подвижные системы индукционных приборов и др. Необходимым условием колебательного звена является наличие двух соединенных емкостей, способных запасать энергию, в которых кинетическая энергия переходит в потенциальную и наоборот. Если полученный запас энергии в процессе такого перехода уменьшается, то колебания затухают и, следовательно, звено устойчиво.

Передаточная функция звена второго порядка (7.32) будет

$$W(p) = \frac{k}{T_0^2 p^2 + Tp + 1}. \tag{7.39}$$

Амплитудно-фазовая характеристика звена

$$W(j\omega) = \frac{k}{T_0^2 (j\omega)^2 + Tj\omega + 1} \tag{7.40}$$

или, имея в виду, что $j^2 = -1$,

$$W(j\omega) = \frac{k}{(1 - T_0^2 \omega^2) + jT\omega}. \tag{7.41}$$

Освобождаясь от мнимости в знаменателе умножением числителя и знаменателя на сопряженное комплексное число $[(1 - T_0^2 \omega^2) - jT\omega]$, получим

$$W(j\omega) = \frac{k(1 - T_0^2 \omega^2) - jkT\omega}{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + T^2 \omega^2}. \tag{7.42}$$

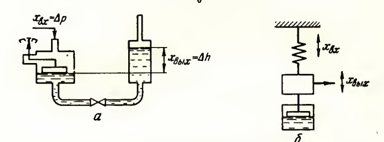


Рис. 7. 15. Примеры колебательных звеньев.

а — дифференциальный манометр; *б* — груз, подвешенный на пружине; *p* — давление; *h* — высота.

Правая часть этого выражения есть комплексное число, вещественная часть α которого равна

$$\alpha = \frac{k(1 - T_0^2 \omega^2)}{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + T^2 \omega^2}. \tag{7.43}$$

Коэффициент β мнимой части равен:

$$\beta = -\frac{kT\omega}{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + T^2 \omega^2}. \tag{7.44}$$

Амплитудно-фазовая характеристика в показательной форме

$$W(j\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + T^2 \omega^2}}\, e^{-j \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega T}{1 - T_0^2 \omega^2}}. \tag{7.45}$$

Графическое изображение амплитудно-фазовой характеристики приведено на рис. 7. 16, из которого видно, что колебания выходной величины с увеличением частоты отстают по фазе от колебаний входной величины. Максимальное отставание достигает 180°.

2-й случай. Характеристическое уравнение (7. 33) имеет действительные и отрицательные корни, когда

$$T^2 - 4T_0 \geqslant 0 \quad \text{или} \quad T \geqslant 2T_0.$$

Из уравнения (7. 31) имеем (без вывода)

$$x_{\text{вых}} = c_1 e^{-r_1 t} + c_2 e^{-r_2 t} + kx_{\text{вх}}. \qquad (7.46)$$

Переходная функция звена

$$x_{\text{вых}}(t) = k + c_1 e^{-r_1 t} + c_2 e^{-r_2 t}. \qquad (7.47)$$

Это уравнение описывает переходный процесс не колебательный, а апериодический. Такое звено называется апериодическим звеном второго порядка. Его можно рассматривать как состоящее из двух последовательно соединенных звеньев первого порядка. Кривая переходной функции апериодического звена второго порядка показана на рис. 7. 17.

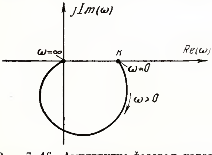


Рис. 7. 16. Амплитудно-фазовая характеристика колебательного звена второго порядка.

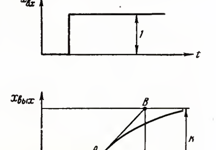


Рис. 7. 17. Переходная функция апериодического звена второго порядка.

Постоянная времени T может быть определена из графика как величина проекции отрезка AB касательной в точке перегиба на ось времени.

Передаточную функцию апериодического звена второго порядка определяют по уравнению (7. 39) при условии, что $T \geqslant 2T_0$.

Интегрирующее звено. Свойства его описываются уравнением

$$T\,\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = kx_{\text{вх}} \qquad (7.48)$$

или в операторной форме

$$Tpx_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}, \qquad (7.49)$$

где T — постоянная времени звена, равная обратному значению скорости изменения выходной величины.

В интегрирующем звене, как это видно из уравнения (7. 48), нет определенного соотношения между установившимися значениями входной и выходной величин. Лишь скорость изменения выходной величины пропорциональна входной величине.

Интегрирование уравнения (7. 48) дает

$$x_{\text{вых}} = \frac{k}{T} \int_0^t x_{\text{вх}}\, dt, \qquad (7.50)$$

откуда следует, что выходная величина пропорциональна интегралу по времени от входной величины.

Переходная функция звена определяется из уравнения (7. 50) при $x_{\text{вх}} = [1]$ и имеет вид:

$$x_{\text{вых}}(t) = \frac{kt}{T}. \qquad (7.51)$$

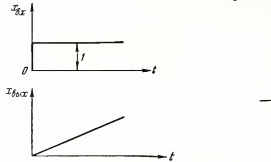


Рис. 7. 18. Переходная функция интегрирующего звена.

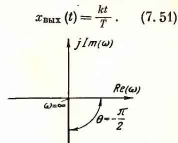


Рис. 7. 19. Амплитудно-фазовая характеристика интегрирующего звена.

Графическое изображение переходной функции дано на рис. 7. 18. Как видно из рисунка, выходная величина не принимает нового постоянного значения. Поэтому это звено называется еще астатическим.

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{Tp}. \qquad (7.52)$$

Амплитудно-фазовая характеристика звена

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega} = -j\frac{k}{T\omega}. \qquad (7.53)$$

Выражение $-j\frac{k}{T\omega}$ есть мнимая часть комплексного числа, вещественная часть которого равна нулю.

В показательной форме амплитудно-фазовая характеристика имеет вид:

$$W(j\omega) = \frac{k}{T\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}}. \qquad (7.54)$$

В этом комплексном числе модулем является $\frac{k}{\omega T}$, а аргументом $-\frac{\pi}{2}$.

Графики амплитудно-фазовой характеристики показаны на рис. 7.19. Конец вектора амплитудно-фазовой характеристики описывает прямую линию на отрицательной части мнимой оси. При изменении ω от 0 до ∞ вектор перемещается от $-\infty$ до 0. Аргумент амплитудно-фазовой характеристики не зависит от частоты и при всех значениях ω равен $-\frac{\pi}{2}$. Некоторые интегрирующие звенья приведены на рис. 7. 20.

На рис. 7. 20, *а* показана схема бака, через который непрерывно протекает жидкость, уровень этой жидкости находится на высоте H.

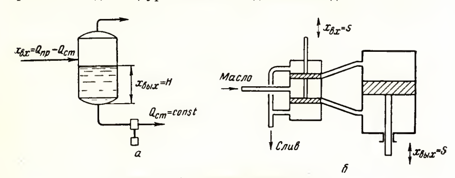


Рис. 7. 20. Интегрирующие звенья.

а — бак с жидкостью при $Q_{ст}=\text{const}$; *б* — поршневой гидравлический привод; $Q_{пр}$ — количество жидкости, поступающей в бак, — приток; $Q_{ст}$ — количество жидкости, вытекающей из бака, — сток; H — высота уровня; S и s — перемещения.

При откачке жидкости насосом с постоянной производительностью разность между притоком и стоком будет приводить к переполнению или полному опорожнению емкости. На рис. 7. 20, *б*, показан поршневой гидравлический привод для перемещения регулирующего органа. Уже самое небольшое отклонение входной величины переместит золотник и откроет отверстие для входа масла в верхнюю или нижнюю полость поршня привода, и последний будет все время перемещаться до предельных положений вверх или вниз. К числу интегрирующих звеньев относится также электродвигатель, число оборотов которого пропорционально напряжению в обмотке возбуждения, и некоторые другие устройства.

Дифференцирующие звенья подразделяются на идеальные и реальные. Идеальным называется такое звено, у которого выходная величина изменяется пропорционально скорости изменения входной величины. Уравнение переходного процесса идеального дифференцирующего звена имеет вид:

$$x_{вых}=k\frac{dx_{вх}}{dt} \tag{7.55}$$

или в операторной форме

$$x_{\text{вых}} = kpx_{\text{вх}}. \quad (7.56)$$

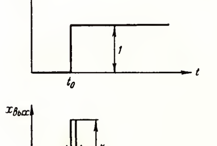
При подаче на вход такого звена скачкообразного возмущения, $x_{\text{вх}} = [1]$ согласно (7. 55), переходная функция $x_{\text{вых}}(t) = 0$. При $x_{\text{вх}} = 0$ $x_{\text{вых}}(t)$ также равно нулю.

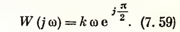
Во время изменения $x_{\text{вх}}$ от 0 до 1 производная $dx_{\text{вх}}/dt$ не равна нулю, а вследствие очень быстрого или мгновенного изменения $x_{\text{вх}}$ она равна бесконечности и $x_{\text{вых}}(t)$ совершает мгновенный импульс (рис. 7. 21).

Передаточная функция идеального дифференцирующего звена

$$W(p) = kp. \quad (7.57)$$

Амплитудно-фазовая характеристика





$$W(j\omega) = kj\omega. \quad (7.58)$$

Амплитудно-фазовая характеристика в показательной форме

$$W(j\omega) = k\omega e^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (7.59)$$

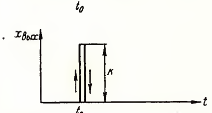


Рис. 7. 21. Переходная функция идеального дифференцирующего звена.

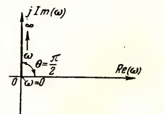


Рис. 7. 22. Амплитудно-фазовая характеристика идеального дифференцирующего звена.

Амплитудно-фазовая характеристика (рис. 7. 22) совпадает с положительным направлением мнимой оси, это говорит о том, что колебания выходной величины опережают по фазе колебания входной величины на угол $+\frac{\pi}{2}$ при всех частотах.

Поскольку всякое реальное устройство всегда инерционно, то осуществить идеальное дифференцирующее звено практически невозможно. Реальное дифференцирующее звено сочетает свойства звена первого порядка и идеального дифференцирующего звена. Зависимость между изменениями входной и выходной ве-

личин у реального дифференцирующего звена выражена уравнением

$$T\frac{dx_{\text{вых}}}{dt}+x_{\text{вых}}=kT\frac{dx_{\text{вх}}}{dt} \qquad (7.60)$$

или в операторной форме

$$(Tp+1)\,x_{\text{вых}}=kTpx_{\text{вх}}. \qquad (7.61)$$

Решение уравнения (7.60) имеет вид:

$$x_{\text{вых}}=kx_{\text{вх}}\,e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (7.62)$$

где T — постоянная времени;
k — коэффициент усиления;
t — время.

Переходная функция реального дифференцирующего звена

$$x_{\text{вых}}(t)=k\,e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (7.63)$$

График этой переходной функции показан на рис. 7. 23. В момент t_0 при изменении $x_{\text{вх}}$ $x_{\text{вых}}$ мгновенно увеличивается до величины коэффициента усиления k, а затем уменьшается по экспоненте. Передаточная функция реального дифференцирующего звена

$$W(p)=\frac{kTp}{Tp+1}. \qquad (7.64)$$

Амплитудно-фазовая характеристика

$$W(j\omega)=\frac{kTj\omega}{Tj\omega+1} \qquad (7.65)$$

или после освобождения от мнимости в знаменателе

$$W(j\omega)=\frac{kT^2\omega^2+jkT\omega}{1+T^2\omega^2}. \qquad (7.66)$$

Амплитудно-фазовая характеристика в показательной форме

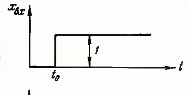
$$W(j\omega)=\frac{kT\omega}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}\,e^{j\,\mathrm{arc\,tg}\,\frac{1}{T\omega}}. \qquad (7.67)$$

График амплитудно-фазовой характеристики показан на рис. 7. 24. При малых частотах колебания выходной величины опережают колебания входной величины на угол близкий $k+\frac{\pi}{2}$. При увеличении частоты угол опережения уменьшается. При $\omega=\infty$ модуль вектора $W(j\omega)$ равен k.

З а п а з д ы в а ю щ е е з в е н о. На характер переходного процесса звена оказывает влияние запаздывания в изменении выходной

величины по сравнению с изменением входной величины. Схемы запаздывающих звеньев приведены на рис. 7. 25. Изменения входной величины без искажений передаются на выход звена, но с отставанием по времени соответственно величине запаздывания.

Переходная функция запаздывающего звена показана на рис. 7. 26. При изменении входной величины в момент времени t_0 и при запаздывании τ_0 между входной и выходной величинами имеет место следующая связь:



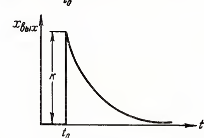


Рис. 7. 23. Переходная функция реального дифференцирующего звена.

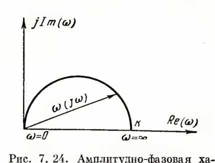


Рис. 7. 24. Амплитудно-фазовая характеристика реального дифференцирующего звена.

$$\left.\begin{aligned} x_{вых}(t) &= 0 \quad \text{при } 0 < t < \tau_0 \\ x_{вых}(t) &= x_{вх}(t-\tau_0) \quad \text{при } t \geqslant \tau_0 \end{aligned}\right\} \qquad (7.68)$$

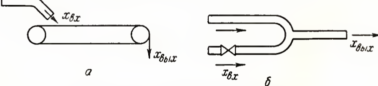


Рис. 7. 25. Примеры запаздывающих звеньев.

а — транспортер; *б* — участок трубопровода для смешения двух жидкостей.

Если на вход звена подать гармонические колебания

$$x_{вх} = x_{вх\,0}\, e^{j\omega t}, \qquad (7.69)$$

то на выходе звена колебания будут такие же, но сдвинутые по фазе на угол $\omega\tau_0$:

$$x_{вых} = x_{вх\,0}\, e^{j\omega(t-\tau_0)}. \qquad (7.70)$$

Амплитудно-фазовая характеристика запаздывающего звена

$$W(j\omega) = \frac{x_{\text{вх }0}\, e^{j\omega(t-\tau_0)}}{x_{\text{вх }0}\, e^{j\omega t}} = e^{-j\omega\tau_0}. \qquad (7.71)$$

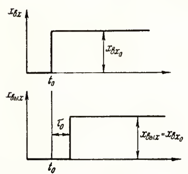


Рис. 7. 26. Переходная функция запаздывающего звена.

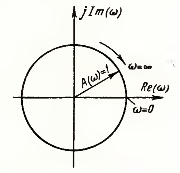


Рис. 7. 27. Амплитудно-фазовая характеристика запаздывающего звена.

Амплитудно-фазовая характеристика (рис. 7. 27) представляет собой окружность с радиусом, равным единице. Сдвиг фаз выходных колебаний пропорционален частоте колебаний на входе. Модуль не зависит от частоты и равен единице, $A(\omega) = 1$

§ 4. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

1. Последовательное соединение

Передаточная функция нескольких звеньев, соединенных последовательно, равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = W(p)_1\, W(p)_2\, W(p)_3 \ldots \qquad (7.72)$$

Так, например, если передаточные функции каждого из двух звеньев, соединенных последовательно, равны (см. 7. 18)

$$W(p)_1 = \frac{x_{\text{вых }1}}{x_{\text{вх }1}} \quad \text{и} \quad W(p)_2 = \frac{x_{\text{вых }2}}{x_{\text{вх }2}},$$

то общая передаточная функция двух звеньев будет

$$W(p)_{1,2} = \frac{x_{\text{вых }2}}{x_{\text{вх }1}}, \qquad (7.73)$$

так как у двух последовательно соединенных звеньев выходная величина первого звена является входной величиной второго звена, т. е. $x_{\text{вых }1} = x_{\text{вх }2}$.

Коэффициент усиления нескольких звеньев, соединенных последовательно, равен произведению коэффициентов усиления отдельных звеньев:

$$k = k_1 k_2 k_3 \ldots \tag{7.74}$$

2. Параллельное соединение

При параллельном соединении звеньев (рис. 7. 28) входная величина поступает одновременно на вход отдельных звеньев. Величины на выходе звеньев суммируются.

Передаточная функция звеньев, соединенных параллельно, равна сумме передаточных функций отдельных звеньев. Например, для двух звеньев с передаточными функциями

$$W(p)_1 = \frac{x_{\text{вых }1}}{x_{\text{вх }1}} \quad \text{и} \quad W(p)_2 = \frac{x_{\text{вых }2}}{x_{\text{вх }2}}$$

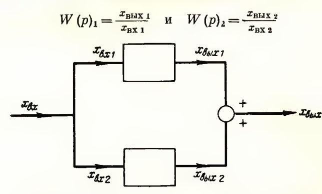


Рис. 7. 28. Параллельное соединение двух звеньев.

общая передаточная функция будет

$$W(p)_{1,2} = \frac{x_{\text{вых }1} + x_{\text{вых }2}}{x_{\text{вх}}}, \tag{7.75}$$

где

$$x_{\text{вх}} = x_{\text{вх }1} = x_{\text{вх }2}.$$

3. Противовключение

Рассмотрим способ противовключения на примере двух звеньев *1* и *2* (рис. 7. 29). На вход первого звена подается сумма из входной величины системы и выходной величины второго звена. Выходная величина первого звена равна выходной величине системы и входной величине второго звена, т. е.

$$x_{\text{вх }1} = x_{\text{вх}} + x_{\text{вых }2},$$

$$x_{\text{вых}} = x_{\text{вых }1} = x_{\text{вх }2}.$$

18 Заказ 1042.

Передаточные функции каждого звена

$$W(p)_1 = \frac{x_{\text{вых }1}}{x_{\text{вх }1}} \quad \text{и} \quad W(p)_2 = \frac{x_{\text{вых }2}}{x_{\text{вх }2}},$$

откуда

$$x_{\text{вх }1} = \frac{x_{\text{вых }1}}{W(p)_1}$$

и

$$x_{\text{вых }2} = W(p)_2\, x_{\text{вх }2}.$$

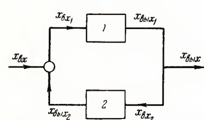


Рис. 7. 29. Схема противовключения двух звеньев.

Передаточная функция двух звеньев

$$W(p)_{1,2} = \frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}} = \frac{x_{\text{вых }1}}{x_{\text{вх }1} - x_{\text{вых }2}}$$

или

$$W(p)_{1,2} = \frac{x_{\text{вых }1}}{\frac{x_{\text{вых }1}}{W(p)_1} - W(p)_2\, x_{\text{вх}2}}.$$

Заменяя $x_{\text{вх }2}$ на $x_{\text{вых }1}$, получаем

$$W(p)_{1,2} = \frac{W(p)_1}{1 - W(p)_1 W(p)_2}. \qquad (7.76)$$

Системы из двух звеньев с противовключением называются системами с обратной связью. В них звено *1* охвачено обратной связью. Звено *2* является звеном обратной связи. Если выходная величина звена обратной связи прибавляется к входной величине системы, что характерно для рассматриваемого случая, то такая обратная связь называется положительной. Если же выходная величина звена обратной связи вычитается из входной величины системы, то обратная связь называется отрицательной. Передаточная функция двух звеньев с отрицательной обратной связью равна

$$W(p)_{1,2} = \frac{W(p)_1}{1 + W(p)_1 W(p)_2}. \qquad (7.77)$$

§ 5. ОБЪЕКТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Объект регулирования можно рассматривать как отдельное звено системы регулирования. Каждый объект имеет свои, присущие ему свойства, которые в той или иной степени оказывают влияние на процесс регулирования. Ниже будут рассмотрены свойства простейших объектов без воздействия на них регулятора.

В нефтепереработке мы встречаемся с большим количеством различных объектов, в которых регулируется какой-либо из параметров — температура, давление, уровень, расход и т. п. К числу

этих объектов относятся трубчатая печь для подогрева нефти, ректификационная колонна, газосепаратор, подогреватель, насосы, участки трубопроводов, по которым течет жидкость, пар или газ.

Структурная схема простейшего объекта показана на рис. 7. 30. Выходной величиной $x_{\text{вых}}$ является какой-либо параметр. Возмущающей величиной y может быть изменение нагрузки объекта или окружающей температуры, давления и т. п. Входной величиной $x_{\text{вх}}$ может быть изменение в подаче вещества или энергии, которыми осуществляется воздействие на выходную величину, например топлива в печь, орошения в колонну и т. п.

Рис. 7. 30. Структурная схема объекта регулирования.

Переходные процессы объектов приближенно описываются линейными дифференциальными уравнениями, порядок и значения коэффициентов которых определяют их свойства. Как и всякое звено системы регулирования, свойства объекта могут характеризоваться переходной и передаточной функциями и амплитудно-фазовой характеристикой.

Объекты нулевого порядка — такие, в которых зависимость между изменениями входной величины и выходной описывается уравнением звена нулевого порядка:

$$x_{\text{вых}} = k_0 x_{\text{вх}}, \tag{7. 78}$$

где k_0 — коэффициент усиления.

Передаточная функция такого объекта равна коэффициенту усиления:

$$W(p) = k_0. \tag{7. 79}$$

График переходной функции объектов нулевого порядка такой же, как и у звена нулевого порядка (см. рис. 7. 9).

Объекты нулевого порядка в практике встречаются редко. К ним можно отнести короткий участок трубопровода, в котором поддерживается давление протекающей жидкости. В таком объекте входной величиной является изменение расхода жидкости, а выходной — ее давление после задвижки (см. рис. 7. 8, *з*). При изменении в подаче давление изменяется мгновенно.

Объекты первого порядка описываются уравнением (7. 24) звена первого порядка:

$$T\,\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k_0 x_{\text{вх}}.$$

К этой группе относится большое число объектов технологических процессов. Как было показано, звено первого порядка характеризуется тем, что при скачкообразном изменении входной величины выходная величина изменяется по экспоненте (см. рис. 7. 11).

Рассмотрим простейший объект — открытый цилиндрический бак, через который непрерывно протекает жидкость. Входной величиной в этом объекте является изменение подачи жидкости, а выходной — уровень h в баке (см. рис. 7. 31, *а*). Жидкость поступает по трубе в открытый бак и вытекает через трубу в его днище. Нагрузкой является количество жидкости, протекающей в единицу времени.

Высота уровня $h_з$ соответствует нормальной нагрузке объекта. Данный объект аккумулирует или накапливает некоторое количество жидкости благодаря сопротивлению на выходе в виде вентиля на спускной трубе. В объекте накапливается только один объем жидкости, поэтому он называется **одноемкостным**.

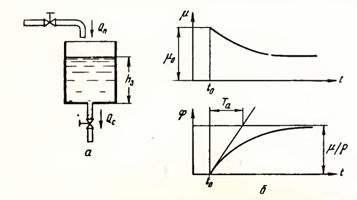


Рис. 7. 31. Схема объекта первого порядка — одноемкостного с самовыравниванием (*а*) и его переходная функция (*б*).

На рис. 7. 13, *б*, *г* и *д* были показаны другие одноемкостные объекты. На рис. 7. 31, *б* показан график переходного процесса рассматриваемого объекта при скачкообразном изменении притока. До момента времени t_0 объект находился в равновесии, приток $Q_п$ был равен стоку $Q_с$ и уровень $h_з$ имел постоянное заданное значение. При увеличении притока жидкости на величину $\Delta Q_п$ уровень в сосуде увеличивается. Одновременно увеличивается и сток вследствие повышения гидростатического давления столба жидкости. Увеличение стока влечет за собой постепенное уменьшение разности между притоком и стоком, а следовательно, уменьшение дальнейшего повышения уровня. В результате через некоторое время, когда сток снова станет равным притоку, уровень, достигнув нового, более высокого значения, перестанет изменяться.

Как видим, такой объект после выведения его из равновесия снова пришел в состояние равновесия без какого-либо вмешательства извне. Такие объекты называются объектами **с самовыравниванием**. Составим дифференциальное уравнение объекта с само-

выравниванием. Введем безразмерные относительные выражения величин. Вместо $Q_п$ и Q_c примем обозначения

$$\frac{Q_п}{Q_{н.п}} = \mu_п \quad и \quad \frac{Q_c}{Q_{н.c}} = \mu_c,$$

где $Q_{н.п}$ и $Q_{н.c}$ — значения притока и стока при постоянном заданном значении выходной величины соответствующие нормальной нагрузке объекта;

$\mu_п$ и μ_c — относительные значения притока и стока.

Разность μ между притоком и стоком или величина возмущающего воздействия соответственно будет

$$\mu = \mu_п - \mu_c.$$

Относительное значение выходной величины φ, характеризующей процесс,

$$\varphi = \frac{\Delta h}{h_з},$$

где Δh — отклонения уровня от заданного значения;

$h_з$ — заданное значение уровня.

При рановесии, когда приток равен стоку, уровень не изменяется. При скачкообразном увеличении притока до установления нового равновесия в сосуде будет накапливаться жидкость и уровень повысится. Скорость повышения уровня будет пропорциональна величине возмущения, которое можно характеризовать разностью между притоком и стоком:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \varepsilon\mu, \tag{7.80}$$

где t — время и ε — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность *1/сек.*

При возмущении $\mu = 1$ величина ε является скоростью изменения выходной величины. За возмущение, равное 1, в объектах регулирования считают максимальное возмущение, вызванное изменением нагрузки на 100%. Это соответствует изменению притока от нуля до значения $Q_{н.п}$ при условии, что в начальный момент сток был равен нулю. Очевидно, что при таком возмущении начальная скорость ε будет максимальной. Величина ε называется еще скоростью разгона.

Нами рассмотрен объект с самовыравниванием. С увеличением уровня h увеличивается сток, и через некоторое время после начала возмущения $Q_п$ станет равным Q_c, уровень жидкости в баке примет новое, более высокое постоянное значение. Разность $Q_п - Q_c$ с течением времени уменьшается, причем она зависит от разности высот уровня.

В общем случае это можно выразить так: изменение возмущающего воздействия в процессе самовыравнивания зависит от изменения

выходной величины. Этому соответствует следующее уравнение (в относительных величинах):

$$\mu = \mu_0 - \varrho(\varphi - \varphi_0), \tag{7.81}$$

где μ_0 — максимальная разность между притоком и стоком в начальный момент;

φ_0 — значение выходной величины до возмущения;

ϱ — коэффициент пропорциональности; величина безразмерная, называемая степенью самовыравнивания объекта.

Подставляя в уравнение (7. 80) значение μ из (7. 81), получим

$$\frac{d\varphi}{dt} = \varepsilon\mu_0 - \varepsilon\varrho(\varphi - \varphi_0)$$

или

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\varepsilon\varrho\left[(\varphi - \varphi_0) - \frac{\mu_0}{\varrho}\right]. \tag{7.82}$$

Это есть дифференциальное уравнение первого порядка. Для начальных условий, приняв $\varphi_0 = 0$, уравнение (7. 82) можно написать в виде:

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varphi}{dt} + \varrho\varphi = \mu_0. \tag{7.83}$$

Величина, обратная скорости разгона ε, имеет размерность времени и называется временем разгона T_a.

Физически величина T_a есть время, в течение которого выходная величина объекта достигает заданного значения, изменяясь от нуля с постоянной скоростью ε при максимальном возмущающем воздействии.

Подставляя в уравнение (7. 83) время разгона T_a вместо скорости разгона ε и зная, что

$$\frac{1}{\varepsilon} = T_a, \tag{7.84}$$

получим

$$T_a\frac{d\varphi}{dt} + \varrho\varphi = \mu_0. \tag{7.85}$$

Дифференциальное уравнение (7. 85) первого порядка соответствует уравнению (7. 24) звена первого порядка. Решая уравнение (7. 85), получаем

$$\varphi = \frac{\mu_0}{\varrho}\left(1 - e^{\frac{-\varrho t}{T_a}}\right). \tag{7.86}$$

Это есть уравнение переходного процесса одноемкостного объекта первого порядка с самовыравниванием. На рис. 7. 31, *б* показан график изменения μ и φ. Как видно, в начальный момент t_0 $\mu = \mu_0$, а $\varphi = 0$. Затем μ постепенно уменьшается и принимает постоянное значение при $t \to \infty$, соответствующее новому состоянию динамиче-

ского равновесия. Величина φ изменяется по экспоненте и имеет максимальное значение при $t \to \infty$, равное μ/ϱ. Постоянная времени этой экспоненты есть время разгона T_a. График изменения φ есть график переходного процесса.

Уравнение (7. 86) выражает переходный процесс не только рассмотренного объекта в виде бака с жидкостью, но и всех других одноемкостных объектов с самовыравниванием. Причем во всех случаях за величину μ принимают относительное значение входной величины, а за φ относительное значение выходной величины согласно приведенным выше их определениям при рассмотрении объекта — бака с жидкостью.

Исходя из того, что отношение выходной величины всякого звена к его входной величине при установившемся состоянии называется коэффициентом усиления, для одноемкостного объекта с самовыравниванием коэффициент усиления из (7. 85) при $t \to \infty$ будет

$$k_0 = \frac{\varphi}{\mu} = \frac{1}{\varrho}. \qquad (7.87)$$

Чем больше ϱ, тем меньше коэффициент усиления и, следовательно, тем меньше изменяется выходная величина при одном и том же возмущении.

Передаточная функция $W_{(p)}$ одноемкостного объекта с самовыравниванием из уравнения (7. 83), если принять $d/dt = p$, имеет вид:

$$W(p) = \frac{\varepsilon}{p + \varepsilon\varrho} \qquad (7.88)$$

Время разгона T_a является постоянной времени T объекта при максимальном возмущении $\mu_0 = 1$, когда нагрузка изменяется на 100%. При любом другом меньшем возмущении $\mu < 1$ время разгона T'_a кривой переходного процесса будет меньше и его можно выразить через μ и T:

$$T'_a = \mu T. \qquad (7.89)$$

Это соотношение позволяет определить время разгона T_a по кривой переходного процесса при небольших возмущениях.

Для всех переходных процессов, описываемых уравнением (7. 86), через промежуток времени, равный 3 T_a или 3 T'_a, величина φ практически уже достигает нового равновесного состояния.

В общем случае количество Q накапливаемого в объекте вещества или энергии в единицу времени (или их убывание) пропорционально скорости изменения выходной величины:

$$Q = C\frac{d\varphi}{dt}, \qquad (7.90)$$

где C — коэффициент пропорциональности, называемый емкостью объекта.

Емкостью объекта можно назвать то количество энергии или вещества, приток которого в объект (или убывание из объекта) вызывает приращение выходной величины на единицу.

Определим размерность величины емкости для разных объектов.

1. Для сосуда с протекающей через него жидкостью (рис. 7. 31,*а*)

$$C_{ж} = \frac{Q}{\frac{dh}{dt}} \ м^2, \tag{7. 91}$$

где Q — количество жидкости, протекающей в единицу времени, в $м^3/сек$;

h — высота уровня жидкости в *м*;

t — время в *сек*.

2. Для теплообменника смешения (рис. 7, 13, *б*)

$$C_T = \frac{Q_в}{\frac{dT_{ж}}{dt}} \ ккал/°C, \tag{7. 92}$$

где $Q_в$ — приток тепла в 1 *сек*;

$T_{ж}$ — температура жидкости на выходе.

3. Для аккумулятора сжатого воздуха или газа (рис. 7. 13, *г*)

$$C_{г} = \frac{Q_{г}}{\frac{dp}{dt}} \ м^3 см^2/кГ, \tag{7. 93}$$

где $Q_{г}$ — приток газа в аккумулятор в $м^3/сек$;

p — давление газа в $кГ/см^2$.

Величина времени разгона T_a может быть найдена расчетным путем. Например, для бака с жидкостью (рис. 7. 31, *а*) время определим по формуле

$$T_a = \frac{Fh_з}{Q_{н.\,п}}, \tag{7. 94}$$

где, кроме ранее принятых обозначений,

F — площадь поперечного сечения бака в $м^2$;

$h_з$ — высота заданного уровня жидкости в *м*.

Согласно (7. 91) величину F можно заменить емкостью C данного объекта. Тогда

$$T_a = \frac{C_{ж} h_з}{Q_{н.\,п}}. \tag{7. 95}$$

Подобным способом можно показать, что время разгона любого одноемкостного объекта с самовыравниванием определяют по формуле

$$T_a = \frac{C\,\varphi_з}{Q_{н.\,п}}, \tag{7. 96}$$

где $\varphi_з$ — заданное значение выходной величины.

Теперь видно, что чем больше C, тем больше время разгона и наоборот.

Самовыравнивание способствует поддержанию выходной величины на заданном значении. В некоторых объектах с большим самовыравниванием выходная величина при возмущениях практически не отклоняется от заданного значения. К таким объектам относится, например, сосуд, в котором уровень жидкости поддерживается при помощи сливной трубы достаточно большого сечения.

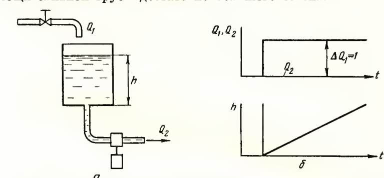


Рис. 7. 32. Объект первого порядка — одноемкостный без самовыравнивания.
а — схема; *б* — переходная функция.

Есть объекты первого порядка без самовыравнивания, в которых $\rho = 0$. Согласно (7. 83) переходный процесс в таких объектах описывается уравнением

$$\frac{d\varphi}{dt} = \varepsilon\mu. \tag{7. 97}$$

Это есть уравнение интегрирующего звена (см. 7.48) и в данном случае уравнение о б ъ е к т а б е з с а м о в ы р а в н и в а н и я.

К числу одноемкостных объектов без самовыравнивания относится бак с поступающей жидкостью, откачиваемой насосом при постоянной производительности. В таком объекте повышение (или понижение) уровня не изменяет величину стока (рис. 7. 32, *а*). Характер переходного процесса объекта без самовыравнивания показан на рис. 7. 32, *б*.

При скачкообразном увеличении притока уровень начинает повышаться. Так как разность между притоком и стоком не уменьшается, а все время остается постоянной, то уровень не сможет установиться на новом постоянном значении, он будет непрерывно увеличиваться, и бак переполнится жидкостью. При уменьшении притока уровень может понизиться до нуля, бак опорожнится. Интегрирование уравнения (7. 97) при $\mu = 1$ дает

$$\varphi = \varepsilon t. \tag{7. 98}$$

Это есть уравнение прямой линии, которое характеризует изменение выходной величины объекта без самовыравнивания (см. рис. 7. 32, *б*) во времени.

Величину ε скорости разгона определяют как тангенс угла наклона прямой.

Передаточная функция одноемкостного объекта без самовыравнивания при $\mu_0 = 1$ будет

$$W(p) = \frac{\varepsilon}{p}. \tag{7.99}$$

Одноемкостные объекты с самовыравниванием называют еще статическими, а без самовыравнивания — астатическими.

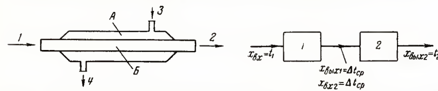


Рис. 7. 33. Объект второго порядка, двухъемкостный с самовыравниванием (теплообменник).

1 и *2* — линии входа и выхода подогреваемого вещества; *3* и *4* — линии входа и выхода нагревающего вещества.

Рис. 7. 34. Структурная схема двухъемкостного объекта.

t_1—температура нагревающего вещества на входе; t_2—температура подогреваемого вещества на выходе; $\Delta t_{ср}$—средняя разность температур.

Объекты второго порядка. Наиболее типичными промышленными объектами второго порядка являются тепловые двухъемкостные объекты с самовыравниванием, к числу которых можно отнести теплообменный аппарат (рис. 7. 33). Переходные процессы таких объектов носят апериодический характер и по своим свойствам могут быть отнесены к апериодическому звену второго порядка.

Рассмотрим теплообменник (рис. 7. 33) как объект регулирования. Пренебрегая небольшой тепловой емкостью стенок трубы, отделяющей нагревающее вещество от подогреваемого, с достаточным приближением можно считать теплообменник двухъемкостным объектом. Количество нагревающего вещества, заполняющего объем A, образует емкость на стороне подачи, а количество подогреваемого вещества, заполняющего объем $Б$ (участка внутренней трубы), образует емкость на стороне потребления. В процессе теплообмена создается тепловое равновесие, причем в пограничной зоне создается определенная средняя температура (при неизменных температурах входа и выхода нагревающего и подогреваемого веществ).

Таким образом, теплообменник можно рассматривать как объект, состоящий из двух звеньев *1* и *2* (рис. 7. 34). Для первого звена входной величиной является температура нагревающего вещества на входе в теплообменник, а выходной — средняя разность темпера-

тур на границе между емкостями на стороне подачи и на стороне потребления. Для второго звена входной величиной является средняя разность температур, а выходной — температура подогреваемого вещества на выходе из теплообменника. Оба звена с самовыравниванием. Так, для первого звена при увеличении температуры нагревающего вещества (при неизменной температуре входа подогреваемого вещества) начнет увеличиваться средняя разность температур. От этого увеличатся передача тепла подогреваемой жидкости и потери тепла в окружающую среду. В результате средняя разность температур, приняв новое более высокое значение, перестанет изменяться и снова наступит тепловое равновесие. Для второго звена при увеличении средней разности температур на входе будут увеличиваться температура на выходе и потери тепла. Через некоторое время выходная температура, повысившись, перестанет изменяться и снова установится тепловое равновесие.

Каждое звено в отдельности можно рассматривать как звено первого порядка. Было показано, что передаточная функция двух звеньев, соединенных последовательно, равна произведению передаточных функций отдельных звеньев. Для упрощения можно принять, что эти звенья имеют одинаковые постоянные времени $T = T_0$. Из (7. 28) и (7. 72) передаточная функция такого объекта второго порядка будет

$$W(p)_{1,2} = \frac{k_1}{Tp+1}\,\frac{k_2}{Tp+1} = \frac{k_0}{T^2p^2+2Tp+1}, \qquad (7.100)$$

где $k_0 = k_1k_2$ — общий коэффициент усиления объекта.

Дифференциальное уравнение такого звена из (7. 18) будет

$$T^2\frac{d^2x_{\text{вых}}}{dt^2} + 2T\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k_0x_{\text{вх}}, \qquad (7.101)$$

или, применяя обозначения $x_{\text{вых}} = \varphi$ и $x_{\text{вх}} = \mu$,

$$T^2\varphi'' + 2T\varphi' + \varphi = k_0\mu. \qquad (7.102)$$

Переходная функция или кривая разгона такого объекта при $\mu = 1$ изображена на рис. 7. 35.

В отличие от одноемкостного объекта кривая разгона двухъемкостного объекта имеет точку перегиба A. Вначале после нанесения возмущения параметр изменяется медленно, затем скорость его изменения увеличивается, и достигнув максимального значения в точке перегиба, снова начинает уменьшаться. К равновесному значению параметр приближается асимптотически. Малая скорость в начале переходного процесса объясняется наличием сопротивления, которое преодолевает энергия или вещество при переходе из зоны подачи в зону потребления, и наличием емкости на стороне потребления.

Постоянная времени T уравнения (7. 102) равна времени от начала возмущения до точки перегиба кривой разгона.

Отрезок времени τ_e, отсекаемый касательной к точке перегиба, на оси абсцисс называется емкостным запаздыванием. Такое запаздывание объясняется тем, что между емкостями в объектах имеется сопротивление (в рассмотренном примере стенки трубы), вызывающее замедленный переход энергии или вещества из одной емкости в другую.

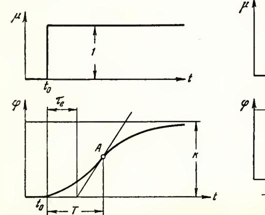


Рис. 7. 35. Переходная функция двухъемкостного объекта с самовыравниванием.

Рис. 7. 36. Кривая разгона двухъемкостного объекта с чистым запаздыванием.

На переходные процессы одноемкостных и двухъемкостных объектов большое влияние оказывает запаздывание. Как было показано ранее, в звеньях с запаздыванием начало изменения выходной величины отстает по времени от начала изменения входной величины. В промышленных объектах такое запаздывание называется чистым, или дистанционным, или передаточным. Оно возникает из-за удаленности месторасположения чувствительного элемента, измеряющего выходную величину объекта, например при установке термопары, измеряющей температуру подогреваемого вещества, в трубопроводе на некотором расстоянии от теплообменника. При наличии чистого запаздывания кривая разгона двухъемкостного объекта будет иметь вид, изображенный на рис. 7. 36. Отрезок времени τ_0 от начала нанесения возмущения до начала изменения регулируемой величины есть чистое запаздывание. Сумма чистого и емкостного запаздываний $\tau_п$ называется полным запаздыванием объекта. Запаздывание в большинстве случаев неблагоприятно сказывается на процессах регулирования.

Большее запаздывание имеют обычно тепловые объекты с регулируемой температурой, меньшее — объекты, в которых регулируются давление, уровень и расход жидкости. Величина запаздывания зависит от конструкции объектов. При проектировании систем регулирования принимают меры к уменьшению запаздывания объектов.

§ 6. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Структурная схема регулятора (без разбивки его конструктивных элементов на звенья) представлена на рис. 7. 37.

Входной величиной $x_{вх}$ регулятора является разность между регулируемой величиной x и его заданным значением $x_{зад}$. Выходной величиной $x_{вых}$ является регулирующее воздействие. За выходную величину принимают обычно перемещение регулирующего органа, а в некоторых случаях величину той энергии, которой осуществляется воздействие на его привод. Можно принять за выходную величину регулятора изменение потока вещества или какого-либо вида энергии, поступающих в объект через регулирующий орган.

Рис. 7. 37. Структурная схема автоматического регулятора.

В дальнейшем изложении входную величину регулятора будем обозначать через φ, а выходную через μ (перемещения регулирующего органа). Величины φ и μ относительные:

$$\varphi = \frac{\text{отклонение регулируемой величины от заданного значения}}{\text{заданное значение регулируемой величины}},$$

$$\mu = \frac{\text{величина перемещения регулирующего органа}}{\text{величина максимально возможного открытия регулирующего органа}}.$$

Было указано, что автоматический регулятор содержит измерительную часть, регулирующую часть и исполнительный механизм. Последний включает привод и регулирующий орган. Для перемещения регулирующего органа требуется энергия. Регуляторы, в которых для перемещения регулирующего органа используется энергия регулируемой среды, называются регуляторами *прямого действия*. В качестве примера на рис. 7. 38 приведен регулятор давления газа прямого действия. Он предназначен для поддержания заданного давления p_2 при условии, что $p_1 > p_2$. Настраивают на заданное значение натяжением пружины *5*. Как видно из схемы, при повышении p_2 плунжер прикрывает проходное отверстие, а при уменьшении открывает. Измерительная часть этого регулятора состоит лишь из одного реагирующего элемента — мембраны. Указателя и шкалы для отсчета регулируемой величины этот регулятор не имеет, их заменяет манометр *9*. Нет и регулирующей части в виде отдельного узла. Регулирующий орган перемещается энергией сжа-

того газа, протекающего по трубопроводу, причем передается эта энергия регулирующему органу через реагирующий элемент.

Для автоматизации промышленных процессов применяют в основном регуляторы непрямого действия. В них для перемещения регулирующего органа используется энергия от постороннего источника. На рис. 7. 39 изображена схема пневматического регулятора давления непрямого действия. В этом регуляторе исполнительный механизм устроен так же, как и регулятор прямого действия, но управляется он уже не непосредственно регулируемым давлением, а давлением

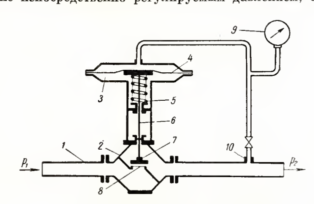


Рис. 7. 38. Схема регулятора давления прямого действия.

1 — газопровод; *2* — регулирующий орган; *3* — привод; *4* — мембрана; *5* — пружина; *6* — шток; *7* — плунжер; *8* — проходное отверстие; *9* — манометр; *10* — штуцер для отбора давления.

сжатого воздуха, величина которого изменяется командным регулирующим прибором. Последний состоит из манометрической пружины *4*, к свободному концу которой прикреплена заслонка *5*, сопла *6* и постоянного дросселя *7*. Площадь проходного отверстия постоянного дросселя меньше площади отверстия сопла, благодаря чему, когда сопло открыто, давление в промежуточном объеме между дросселем и соплом, а также и над мембраной привода исполнительного механизма равно атмосферному. Если же заслонка прикрывает сопло, то давление воздуха после дросселя возрастает до давления питания. Исполнительный механизм при отсутствии давления над мембраной открывает регулирующий орган, а при давлении закрывает.

При увеличении регулируемого давления свободный конец пружины манометра отходит влево, заслонка прикрывает сопло, давление над мембраной исполнительного механизма увеличивается и регулирующий орган прикрывается. Когда после этого регулируемое давление станет меньше заданного, то заслонка отойдет от сопла,

давление воздуха над мембраной уменьшится и регулирующий орган откроется.

Сжатый воздух для работы регулятора подается компрессором (на схеме не показан). Давление сжатого воздуха перед регулятором поддерживается постоянным, равным обычно около 1,2 *кГ/см²*. Величина регулируемого давления практически может быть любой и ограничивается верхним пределом измерения манометрической пружины. Изменение заданного значения регулируемого давления достигается начальной установкой заслонки относительно сопла.

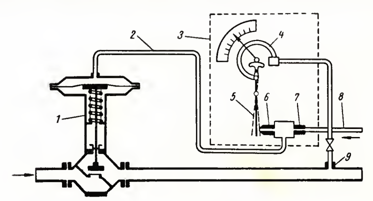


Рис. 7. 39. Схема пневматического регулятора непрямого действия.

1 — исполнительный механизм; *2* — линия связи; *3* — командный регулирующий прибор; *4* — манометрическая пружина; *5* — заслонка; *6* — сопло; *7* — постоянный дроссель; *8* — линия подачи сжатого воздуха 1,2 *кГ/см²*; *9* — штуцер для отбора регулируемого давления.

Как видно из схемы, реагирующим элементом данного регулятора является манометрическая пружина. Сопло, заслонка и постоянный дроссель образует регулирующее устройство. Регулятор снабжен указателем и шкалой.

Наиболее важной характеристикой автоматических регуляторов, которая позволяет подразделять их на отдельные типы, является зависимость между отклонениями регулируемой величины от заданного значения и перемещениями регулирующего органа. Соответственно этому наиболее распространенные регуляторы промышленных процессов подразделяются на следующие типы.

1. Пропорциональные или П-регуляторы, называемые еще статическими.

2. Интегральные или И-регуляторы — астатические.

3. Пропорционально-интегральные или ПИ-регуляторы — изодромные.

4. Пропорционально-дифференциальные или ПД-регуляторы — пропорциональные с предварением или пропорциональные с введением производной.

5. Пропорционально-интегральные-дифференцирующие или ПИД-регуляторы или изодромные с предварением.

6. Двухпозиционные регуляторы — особая группа регуляторов, относящаяся к нелинейным системам. Выходная величина этих регуляторов изменяется скачкообразно между двумя крайними значениями. Регулирующий орган может занимать только два положения — открытое и закрытое. К этой группе относятся также трехпозиционные регуляторы.

Рассмотрим каждый из этих типов регуляторов более подробно.

П-регуляторы. Первый автоматический регулятор пропорционального действия был изобретен знаменитым русским механиком И. И. Ползуновым в 1765 г. Он изготовил регулятор уровня прямого действия для изобретенного им же первого в мире парового котла. В регуляторе Ползунова поплавок, плавающий на поверхности воды, был связан рычагом с клапаном впуска воды. При понижении уровня клапан открывался, а при повышении закрывался. В 1784 г. английский механик Джемс Уатт изобрел центробежный регулятор числа оборотов вала паровой машины, в основу которого был положен также принцип П-регулятора. В связи с этим принципу действия П-регулятора присвоено имя Ползунова-Уатта.

Обратимся к рис. 7. 38 описанного П-регулятора прямого действия.

Исходя из условия равновесия сил, действующих на подвижную систему регулятора, получаем уравнение П-регулятора.

Регулируемое давление действует на мембрану сверху и создает силу, перемещающую подвижную систему вниз. Этой силе противодействует сила упругости пружины. Пренебрегая весом системы, имеем

$$\Delta pF = c\,\Delta l,$$

где Δp — приращение регулируемого давления;
F — площадь мембраны;
c — коэффициент жесткости пружины;
Δl — приращение перемещения регулирующего органа.

Отсюда

$$\Delta l = \frac{\Delta pF}{c}.$$

Поскольку F и c величины постоянные, можно написать

$$\Delta l = k_p\,\Delta p$$

или, заменив Δl и Δp на μ и φ, получим уравнение

$$\mu = k_p\,\varphi. \qquad (7.103)$$

Здесь k_p есть коэффициент усиления регулятора. Он равен отношению приращения перемещения регулирующего органа к приращению регулируемой величины.

Из уравнения (7. 103) следует, что у П-регулятора каждому значению регулируемой величины соответствует только одно положение регулирующего органа. Статическая характеристика такого П-регулятора приведена на рис. 7. 40. Плунжер регулирующего органа начинает перемещаться в сторону закрытия при значениях регулируемого давления $p > p_0$ и заканчивает при предельном для данного регулятора значении $p_{пр}$. Другими словами, для перемещения регулирующего органа из открытого в закрытое положение регулируемое давление должно измениться в пределах, равных $p_{пр} - p_0$.

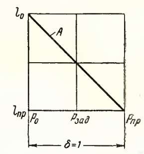


Рис. 7. 40. Статическая характеристика П-регулятора.

Эти пределы называют **неравномерностью** регулятора, а в практике эксплуатации — **пределами пропорциональности**, пределами дросселирования и диапазоном дросселирования.

Значение неравномерности δ определяют из отношения:

$$\delta = \frac{p_{пр} - p_0}{l_{пр} - l_0}$$

или в общем виде

$$\delta = \frac{\varphi}{\mu}. \quad (7.104)$$

Неравномерность δ есть величина, обратная коэффициенту усиления k, и характеризует отношение изменения регулируемого параметра к изменению перемещения регулирующего органа.

Прямая A (рис. 7. 40) соответствует характеристике регулятора, имеющего неравномерность $\delta = 1$, при которой изменение регулируемой величины на 1% вызывает перемещения регулирующего органа также на 1% хода.

Неравномерность регуляторов непрямого действия можно изменять в широких пределах, и она имеет значения меньше и больше единицы. Если неравномерность равна 0,5, то это означает, что при изменении регулируемого параметра на 1% шкалы регулятора регулирующий орган переместится на 2% своего хода. Если неравномерность равна 1,5, то на 1% изменения параметра регулирующий орган переместится всего на 0,66% своего хода и т. д.

Очевидно, чем меньше неравномерность, тем меньше диапазон изменения параметра, в котором регулирующий орган перемещается на полный ход, и наоборот. В связи с этим неравномерность регуляторов непрямого действия принято определять как участок шкалы

регулятора, выраженный в процентах от всей шкалы, в пределах которого изменения регулируемого параметра вызывают перемещения регулирующего органа на полный ход. В этом случае неравномерность 1,0 соответствует 100%; 0,5—50,0%; 1,5 — 150,0% и т. д.

Свойство П-регулятора, состоящее в том, что каждому значению регулируемой величины отвечает всегда только одно и то же положение регулирующего органа, является причиной того, что в процессе регулирования П-регулятор при изменениях нагрузки объекта не обеспечивает поддержание регулируемой величины на заданном значении. В зависимости от степени изменения нагрузки объекта новое установившееся значение регулируемой величины отличается от заданного на некоторую величину, называемую остаточным отклонением. Это обстоятельство ограничивает область применения П-регуляторов. Для пояснения этого обратимся к рис. 7. 41, на котором изображена схема регулирования давления газа в сети потребления. Объектом регулирования является сеть газопроводов после регулятора, из которой газ поступает к потребителям (форсункам промышленных печей и т. п.). Нормальной нагрузкой этого объекта является расчетное количество потребляемого газа. Задачей регулятора является поддержание давления на стороне выхода.

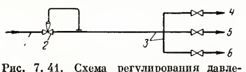


Рис. 7. 41. Схема регулирования давления газа в сети потребления.

1 — подводящий газопровод; 2 — П-регулятор; 3 — разветвленная сеть газопроводов; 4, 5 и 6 — потребители газа.

Пусть при нормальной нагрузке регулятор поддерживает давление, которое является заданным значением регулируемой величины $\varphi_з$. Рассмотрим, как будет изменяться давление после регулятора при изменениях нагрузки объекта (рис. 7. 42). Предположим, что до некоторого момента времени t_0 нагрузка не изменялась, давление после регулятора было равно заданному. В момент времени t_0 нагрузка объекта увеличилась скачкообразно. Это вызовет падение давления после регулятора. Последний начнет открывать регулирующий орган и увеличивать подачу газа. Давление после регулятора начнет повышаться (сплошная кривая). Регулирующий орган перемещается по такому же закону, по которому изменяется регулируемое давление (пунктирная кривая), т. е. при уменьшении давления он открывается и при увеличении давления закрывается. В результате давление повысится и примет новое постоянное значение, которое будет меньше заданного на величину отклонения $p_{ост}$. Объясняется это тем, что при увеличившейся нагрузке регулятор должен пропустить через себя больше газа, но сделать это он может лишь при более низком давлении, когда его регулирующий орган открыт в большей степени, чем при нормальной нагрузке.

Рассуждая аналогично, можно показать, что при уменьшении нагрузки регулятор будет поддерживать более высокое давление, чем заданное.

Остаточное отклонение есть изменение регулируемой величины, вызывающее перемещение регулирующего органа, которое увеличивает или уменьшает его производительность на величину, равную изменению нагрузки.

Величина остаточного отклонения параметра $\Delta x_{\text{вых. ост}}$ зависит от неравномерности δ регулятора, диапазона его шкалы $T_{\text{шк}}$, приращения нагрузки $\Delta q_{\text{н}}$ и диапазона производительности регулирующего органа, равного разности $q_{\max} - q_{\min}$ — максимальной и минимальной производительностей, при которых регулятор еще способен автоматически регулировать. Имея эти величины, остаточное отклонение можно вычислить по формуле

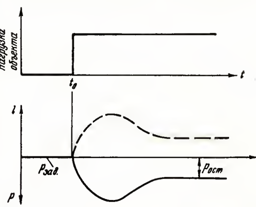


Рис. 7. 42. График действия П-регулятора при изменении нагрузки объекта.

$$\Delta x_{\text{вых. ост}} = \frac{\delta\, T_{\text{шк}}\, \Delta q_{\text{н}}}{q_{\max} - q_{\min}}\,. \qquad (7.105)$$

Пример. П-регулятор пневматического действия регулирует давление газа на заданом значении, равном 3 *кГ/см²*. Неравномерность регулятора $\delta = 0{,}15$. Регулирующий орган — клапан $d_y = 2''$ — имеет $q_{\max} = 25\,000$ *м³/ч* и $q_{\min} = 500$ *м³/ч* газа при стандартных условиях. Нормальная нагрузка, при которой заданное давление поддерживается равным 3 *кГ/см²*, составляет 5000 *м³/ч*. От увеличения потребления газа нагрузка регулятора стала равной 15 000 *м³/ч*, т. е. $\Delta q_{\text{н}} = 10\,000$ *м³/ч*. Требуется определить, какое будет остаточное отклонение параметра после установления нового равновесного состояния при новой нагрузке. Подставляя значения величин, входящих в формулу (7. 105), получим

$$\Delta x_{\text{вых. ост}} = \frac{0{,}15 \cdot 6 \cdot 10\,000}{25\,000 - 500} = 0{,}37 \ \text{кГ/см}^2.$$

Отсюда следует, что при новой нагрузке регулятор будет поддерживать давление не 3, а 2,63 *кГ/см²*.

Если при работе этого же регулятора нагрузка уменьшится и количество газа, пропускаемого через его регулирующий орган,

станет равным, например, 1000 *м³/ч*, т. е. $\Delta q_н = 4000$ *м³/ч*, то остаточное отклонение составит

$$\Delta x_{вых.\ ост} = \frac{0,15 \cdot 6 \cdot 4000}{25\,000 - 500} = 0,156 \ кГ/см^2.$$

Новое значение давления, поддерживаемое регулятором, будет 3,156 $кГ/см^2$.

Диапазон производительности регулирующего органа принято характеризовать еще отношением $L = q_{max}/q_{min}$, которое называют регулирующей способностью. Для регулирующих клапанов пневматического действия $L \approx 50$. Бóльшую величину L имеют клапаны, плотно перекрывающие проходное сечение и регулирующие расход при небольшом открытии.

Как видно, величина остаточного отклонения зависит от нескольких факторов, в том числе и от выбора степени открытия регулирующего органа при нормальной нагрузке. С увеличением L возрастает запас регулирующего органа по производительности и, следовательно, работа регулятора будет протекать при бóльших изменениях нагрузки с меньшим остаточным отклонением регулируемого параметра.

Рассмотрим теперь П-регулятор непрямого действия. Схема такого регулятора с отрицательной обратной связью показана на рис. 7. 43. Основными узлами его являются: управляющий элемент, состоящий из сопла *19* и заслонки *18*; усилитель *20*; исполнительный механизм *1*; механизм обратной связи *4*; система рычагов и тяг, образующих суммирующее устройство, через которое передаются на управляющий элемент воздействия от измерительной части (на схеме не показано) и от механизма обратной связи.

Измерительная часть регулятора, которой может быть, например, электронный потенциометр, поплавковый дифманометр, самопишущий манометр или термометр и т. п., воздействует на рычаг *7*. К рычагу *7* в средней его части прикреплена тяга *9*, соединенная с трехплечим рычагом *16*, на нижнем плече которого имеется штифт *17*. При отклонении регулируемой величины от заданного значения рычаг *7* поднимается или опускается, поворачиваясь вокруг точки опоры *8*. Вместе с ним поднимается или опускается тяга *9*, поворачивается рычаг *16*, и заслонка *18* отдаляется или приближается к соплу *19*. Так воздействует измерительная часть на управляющий элемент.

К соплу *19* подается сжатый воздух по линии питания *21* через постоянный дроссель усилителя *20*. Действие такого усилителя было описано в главе 2 (см. рис. 2. 16). Когда заслонка *18* прикрывает сопло *19*, то давление на выходе усилителя повышается, а когда открывает, то оно понижается.

Одновременно давление сжатого воздуха на выходе из регулятора передается по трубке *3* механизму обратной связи *4*. При повышении

давления в полости над сильфоном *5* последний сжимается и перемещает шток *11* вправо. Конец штока через рычаг *12* и подвижный штифт *14* воздействует на большой рычаг *15*, к нижнему концу кото-

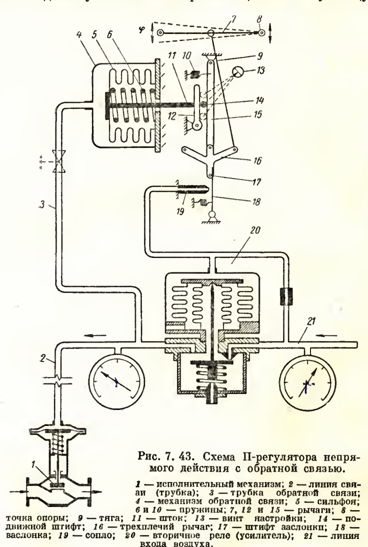


Рис. 7. 43. Схема П-регулятора непрямого действия с обратной связью.

1 — исполнительный механизм; *2* — линия связи (трубка); *3* — трубка обратной связи; *4* — механизм обратной связи; *5* — сильфон; *6* и *10* — пружины; *7*, *12* и *15* — рычаги; *8* — точка опоры; *9* — тяга; *11* — шток; *13* — винт настройки; *14* — подвижной штифт; *16* — трехплечий рычаг; *17* — штифт заслонки; *18* — заслонка; *19* — сопло; *20* — вторичное реле (усилитель); *21* — линия входа воздуха.

рого прикреплен трехплечий рычаг *16*. Когда рычаг *15* перемещается вправо, заслонка *18* отодвигается от сопла. При уменьшении давления над сильфоном *5* вся система под действием

пружин *6* и *10* движется влево и заслонка приближается к соплу *19*.

Воздействие механизма обратной связи на заслонку *18* можно изменять перемещением штифта *14* вдоль рычагов *12* и *15* при помощи винта настройки *13*.

Регулятор питается сжатым воздухом при постоянном давлении на входе, равном 1,1 *кГ/см*^{2}.

Как видно из описания, действие на заслонку механизма обратной связи противоположно действию на нее со стороны измерительной части. Когда действием измерительной части заслонка прикрывает сопло, давление на выходе регулятора повышается и от этого одновременно механизм обратной связи отводит заслонку от сопла. Благодаря этому создается пропорциональное действие регулятора.

Заданное значение регулируемой величины в этом регуляторе можно изменять вручную, перемещая точку опоры *8* рычага *7* вверх или вниз, чем изменяется исходное положение заслонки *18* относительно сопла *19*. Такие регуляторы снабжаются шкалой с указателем измеряемой величины. Когда регулируемая величина имеет заданное значение, заслонка находится в середине рабочего хода по отношению к соплу. Промежуточным положениям заслонки между полным открытием и полным закрытием сопла соответствуют давления на выходе регулятора между 0 и 1 *кГ/см*^{2}. Если регулируемая величина не изменяется, то заслонка *18* остается в фиксированном положении и выходное давление, а следовательно, и положение регулирующего органа не изменяются.

Давление сжатого воздуха на выходе из регулятора полностью определяет положение регулирующего органа. При давлении 1 *кГ/см*^{2} он закрыт, а при 0 *кГ/см*^{2} открыт.

Рассмотренную схему П-регулятора непрямого действия можно разбить на три элементарных звена: сопло — заслонка, усилитель и обратная связь. Все они являются звеньями нулевого порядка. Первые два звена соединены последовательно и их можно заменить одним звеном нулевого порядка.

Входной величиной усилителя для рассматриваемого регулятора являются перемещения заслонки *18* как результат суммарного воздействия на нее регулируемой величины φ и выходной величины обратной связи. Выходной величиной усилителя является давление на выходе из регулятора (в трубке *2*). Входной величиной обратной связи является выходное давление регулятора, а выходной — воздействие на заслонку *18*. Тогда структурная схема регулятора будет состоять из двух звеньев, соединенных параллельно с противовключением, из которых одно является усилителем, а второе звеном отрицательной обратной связи (рис. 7. 44). Согласно (7. 77) передаточная функция $W(p)_п$ такого регулятора будет

$$W(p)_п = \frac{W(p)_у}{1 + W(p)_у W(p)_{о.\,с}}, \qquad (7.106)$$

где $W(p)_у$ — передаточная функция усилителя;

$W(p)_{о.с}$ — передаточная функция обратной связи.

Ранее было показано, что передаточная функция звена нулевого порядка равна коэффициенту усиления. Для данного случая

$$W(p)_у = k_у \quad и \quad W(p)_{о.с} = k_{о.с}.$$

Тогда получаем

$$W(p)_п = \frac{k_у}{1 + k_у k_{о.с}} \tag{7.107}$$

или

$$W(p)_п = \frac{1}{\frac{1}{k_у} + k_{о.с}}. \tag{7.108}$$

В пневматических регуляторах усилитель в виде системы сопло — заслонка имеет очень большой коэффициент усиления. Для изменения давления от 0 до 1 *кГ/см*^{2} требуются очень маленький ход заслонки (около 0,05 *мм*) и очень небольшое изменение регулируемой величины. Поэтому величину $1/k_у$ можно принять равной нулю. Тогда передаточная функция регулятора будет равна обратному значению передаточной функции звена обратной связи:

$$W(p)_п = \frac{1}{k_{о.с}}. \tag{7.109}$$

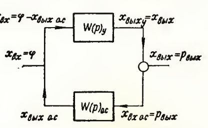


Рис. 7. 44. Структурная схема П-регулятора непрямого действия с обратной связью.

Отсюда следует также общий вывод, что в пневматических регуляторах с усилителем, подобным по своей конструкции описанному (рис. 7. 43), передаточная функция определяется только передаточной функцией его обратной связи. Поэтому можно создать регуляторы разных типов, применяя обратную связь соответствующей характеристики.

Для создания регулятора со структурной схемой, изображенной на рис. 7. 44, необходимо, чтобы обратная величина коэффициента усиления звена обратной связи была равна коэффициенту усиления регулятора, т. е.

$$\frac{1}{k_{о.с}} = k_р. \tag{7.110}$$

Напомним, что зависимость между входной и выходной величинами системы или звена выражается через передаточную функцию (см. 7. 18):

$$x_{вых} = W(p)\, x_{вх}.$$

Тогда, учитывая, что $x_{вых} = \mu$, $x_{вх} = \varphi$ и $W(p) = \frac{1}{k_{о.с}}$, получим уравнение пропорционального регулятора

$$\mu = \frac{1}{k_{о.\,с}}\varphi = k_{р}\varphi. \qquad (7.111)$$

Как видно, коэффициент усиления звена обратной связи есть не что иное, как неравномерность регулятора, т. е. $k_{о.\,с} = \delta$. Величину неравномерности можно изменять в широких пределах, перемещая штифт *14* винтом *13* вдоль рычагов *12* и *15* (рис. 7. 43). При опускании штифта *14* обратная связь и неравномерность уменьшится.

Описанный П-регулятор называется регулятором с жесткой обратной связью, так как его обратная связь действует только тогда, когда изменяется регулируемая величина. Применение жесткой обратной связи улучшает качество регулятора, повышает устойчивость процесса регулирования. Но основной недостаток П-регулятора — регулирование с остаточным отклонением регулируемой величины — относится и к этому регулятору с жесткой обратной связью.

Из схемы регулятора (см. рис. 7. 43) видно, что обратная связь противодействует приближению или удалению заслонки от сопла при изменении регулируемой величины. Чтобы заслонка прошла свой полный рабочий ход относительно сопла, регулируемая величина должна измениться в некоторых пределах, которые и характеризуют неравномерность или пределы пропорциональности регулятора.

П-регуляторы с жесткой обратной связью в большинстве случаев изготовляют со шкалой и указателем или, если без них, то на определенные пределы измерения регулируемой величины.

Неравномерность δ такого регулятора вычисляют из отношения

$$\delta = \frac{\Delta T_{шк}}{\Delta l} 100\,\%, \qquad (7.112)$$

где $\Delta T_{шк}$ — изменение регулируемой величины в процентах от всей шкалы;

Δl — перемещения регулирующего органа в процентах от полного хода, вызванные изменением регулируемой величины на $\Delta T_{шк}$.

В пневматических регуляторах вместо перемещения регулирующего органа можно использовать величину выходного давления $p_{вых}$ в $кГ/см^2$, изменяющегося от 0 до 1 $кГ/см^2$. Тогда формула (7. 112) будет иметь вид:

$$\delta = \frac{\Delta T_{шк}}{\Delta p_{вых}}\,\%. \qquad (7.113)$$

Если регулятор имеет нелинейную шкалу (неравномерную), то $\Delta T_{шк}$ определяют по линейному перемещению указателя, выраженному в процентах длины всей шкалы.

Изображенная на рис. 7. 39 схема пневматического регулятора является схемой П-регулятора непрямого действия, но без обратной связи. Пропорциональное действие этого регулятора создается за счет постепенного отхода или приближения заслонки к соплу. Изменение соотношения плеч рычага заслонки путем перемещения его точки опоры вниз или вверх вдоль заслонки дает возможность изменять неравномерность регулятора в пределах примерно от 5 до 60%.

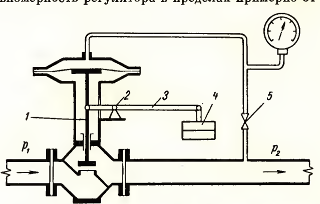


Рис. 7. 45. Схема И-регулятора прямого действия.

1 — шток плунжера; 2 — точка опоры рычага; 3 — рычаг; 4 — груз; 5 — вентиль (дроссель).

И-регуляторы. Схема И-регулятора давления жидкости прямого действия приведена на рис. 7. 45. Он отличается от П-регулятора прямого действия (см. рис. 7. 38) только тем, что у него сила, противодействующая перемещению мембраны и плунжера вниз, создается не пружиной, а весом груза *4*. Как видно из схемы, груз подвешен к свободному концу рычага *3*, имеющего точку опоры *2*. Другой конец рычага скреплен со штоком регулирующего органа.

Плунжер этого регулятора может находиться в равновесии лишь при условии равенства моментов сил, действующих на рычаг с грузом относительно точки опоры *2*. Один из этих моментов создается силой давления жидкости над мембраной, другой — силой веса груза *4*. Если момент силы давления больше момента силы веса груза, то плунжер опускается, а если меньше, поднимается. Пренебрегая небольшим изменением длины плеча груза при вращении рычага, можно считать, что при постоянном весе груза перемещения плунжера зависят только от изменения давления жидкости над мембраной.

Давление над мембраной, при котором моменты сил равны, соответствует давлению задания, т. е. тому, которое должен поддерживать регулятор. При отклонении регулируемого давления от заданного система начнет перемещаться. Если, например, регулируемое давление (а следовательно, и давление над мембраной) стало выше заданного, то плунжер переместится вниз. Причем он будет двигаться вниз и прикрывать проходное сечение до тех пор, пока регулируемое давление не станет равным заданному. При уменьшении регулируемого давления плунжер будет перемещаться вверх также до тех пор, пока это давление снова не станет равным заданному.

Анализируя действие этого регулятора, видим, что его плунжер занимает любое положение в пределах рабочего хода для поддержания регулируемого давления на заданном значении. Благодаря такому действию И-регулятор поддерживает регулируемое давление при изменениях нагрузки всегда на заданном значении.

Плунжер этого регулятора перемещается медленно из-за наличия дросселя *5* на трубке, соединяющей основной трубопровод с камерой над мембраной. Этот дроссель замедляет поступление жидкости в мембранную камеру или выход жидкости из нее.

Скорость движения плунжера зависит от количества жидкости (или другой среды), поступающей в камеру или выходящей из нее в единицу времени. Это количество зависит от величины сечения дросселя и пропорционально перепаду давления на нем, а следовательно, величине отклонения регулируемого давления от заданного значения.

Входной величиной φ этого регулятора являются изменения регулируемого давления, а выходной μ — перемещения плунжера. Зависимость между ними выражается уравнением переходного процесса интегрирующего звена

$$T_s \frac{d\mu}{dt} = \varphi, \qquad (7.114)$$

где T_s — постоянная времени — время, в течение которого плунжер проходит полный ход при максимальной скорости; величина T_s может изменяться путем изменения проходного сечения дросселя *5*.

Интегрирование уравнения (7. 114) дает уравнение И-регулятора

$$\mu = \frac{1}{T_s} \int\limits_0^t \varphi \, dt. \qquad (7.115)$$

График переходной функции И-регулятора при скачкообразном изменении регулируемой величины имеет вид такой же, как и график переходной функции интегрирующего звена (см. рис. 7. 18). Передаточная функция И-регулятора из (7. 114) имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{T_s p}. \qquad (7.116)$$

График перемещения плунжера И-регулятора в зависимости от отклонения регулируемой величины при изменении нагрузки объекта с самовыравниванием приведен на рис. 7. 46. В момент t_0 нагрузка (кривая *1*) резко увеличилась (увеличилось потребление жидкости, протекающей через регулятор), давление p_2 сначала уменьшилось (кривая *2*), затем изменилось по затухающей кривой.

Плунжер регулятора переместился соответственно кривой *3*. Все то время, в течение которого регулируемая величина находилась ниже (или выше) заданного значения, плунжер перемещался непрерывно только в одном направлении в сторону открытия (или закрытия).

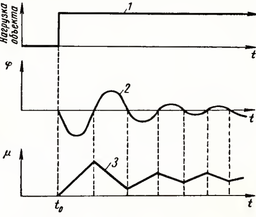


Рис. 7. 46. График действия И-регулятора при изменении нагрузки объекта.

Как видно, И-регулятор поддерживает регулируемую величину на заданном значении, а его плунжер при увеличении нагрузки занимает новое положение. Благодаря такому действию процесс регулирования протекает без остаточного отклонения регулируемой величины, что является весьма ценным свойством И-регулятора. В практике описанные И-регуляторы с грузом применяются также и для регулирования давления пара и газа.

П И - р е г у л я т о р ы сочетают свойства пропорциональных и интегральных регуляторов. Выполняют их обычно непрямого действия. Структурная схема ПИ-регулятора такая же, как и П-регулятора с обратной связью (рис. 7. 44). Разница состоит в том, что обратную связь ПИ-регулятора выполняет реальное дифференцирующее звено, а не звено нулевого порядка, как у П-регулятора.

Передаточная функция обратной связи как реального дифференцирующего звена имеет вид (см. 7. 64):

$$W(p)_{\text{о. с}} = \frac{k_{\text{о. с}} T p}{Tp + 1}.$$

Как было показано при выводе уравнения П-регулятора, передаточная функция ПИ-регулятора должна быть равна обратному значению передаточной функции обратной связи:

$$W(p) = \frac{1}{k_{\text{о. с}}} \frac{Tp + 1}{Tp} = k_{\text{р}} \frac{Tp + 1}{Tp}.$$

Из (7.18) находим

$$\mu = k_p\left(\varphi + \frac{1}{T}\int_0^t \varphi\, dt\right).$$

Известно, что $k_p = \frac{1}{\delta}$. Обозначив T через T_i, получим уравнение ПИ-регулятора

$$\mu = \left(\frac{\varphi}{\delta} + \frac{1}{\delta T_i}\int_0^t \varphi\, dt\right), \qquad (7.117)$$

где T_i — время изодрома.

Передаточная функция ПИ-регулятора с учетом принятых обозначений будет

$$W(p)_{\text{ПИ}} = \frac{1 + T_i p}{\delta T_i p}. \qquad (7.118)$$

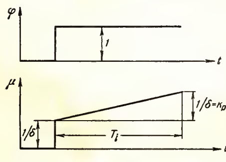


Рис. 7. 47. Переходная функция ПИ-регулятора.

Из уравнения (7.117) следует, что величина перемещения регулирующего органа ПИ-регулятора зависит от отклонения регулируемой величины и от времени отклонения.

Переходная функция ПИ-регулятора при скачкообразном изменении входной величины ($\varphi = 1$) из (7.117) имеет вид:

$$\mu = \frac{1}{\delta} + \frac{t}{\delta T_i}. \qquad (7.119)$$

График переходной функции приведен на рис. 7.47, из которого определяют T_i. Как видно, величина $1/\delta$ есть мгновенное перемещение регулирующего органа при скачкообразном изменении φ. Время изодрома T_i есть время, в течение которого регулирующий орган переместится еще на величину, равную $1/\delta$.

Неравномерность ПИ-регулятора определяют так же, как и для П-регулятора, по формулам (7.104), (7.112) или (7.113).

На рис. 7.48 приведена упрощенная схема широко распространенного пневматического ПИ-регулятора типа 04. Сжатый воздух по трубке *1* при давлении 1,1 *кГ/см*² поступает через постоянный дроссель *2* к соплу *6* и в усилитель *3* (см. рис. 7.43). В случае приближения заслонки *7* к соплу (рис. 7.48) давление воздуха на выходе из усилителя в трубке *4*, ведущей к мембранному приводу исполнительного механизма (на рисунке не показан), увеличивается, а при удалении уменьшается. Регулируемая величина при изменении воздействует на рычаг *21* в точке *20*. Перемещения рычага *21* через тягу *11* и трехплечий рычаг со штифтом *8* передаются заслонке. Одно-

временно через суммирующее устройство на положение заслонки воздействует звено обратной связи. Последнее состоит из двух пар сильфонов *18*, *19* и *23*, *24*, заключенных в металлические кожухи и соединенных общим штоком *16*. Пространство между сильфонами

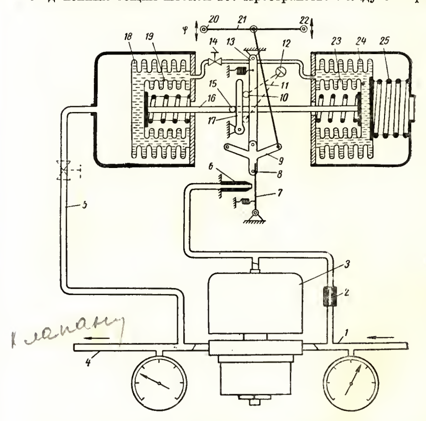


Рис. 7. 48. Схема ПИ-регулятора пневматического действия типа 04.

1 — линия сжатого воздуха; *2* — постоянный дроссель; *3* — усилитель; *4* — линия выхода воздуха; *5* — трубка обратной связи; *6* — сопло; *7* — заслонка; *8* — штифт заслонки; *9* — трехплечий рычаг; *10* — штифт передвижной; *11* — тяга; *12* — винт настройки неравномерности; *13* и *17* — рычаги; *14* — игольчатый вентиль настройки времени изодрома; *15* — штифт; *16* — шток; *18*, *19*, *23* и *24* — сильфоны; *20* — точка присоединения тяги от измерительной части; *21* — рычаг; *22* — опора рычага; *25* — пружина.

заполнено жидкостью (толуолом). На трубке, соединяющей пространство между сильфонами, расположен регулируемый дроссель *14* — игольчатый вентиль малых размеров. Пространство над сильфоном *24* сообщено с атмосферой; между сильфоном *24* и кожухом расположена пружина *25*.

Выходной величиной этого звена обратной связи является перемещение штифта *15* на штоке *16*, которое воздействует на суммирующее устройство заслонки. Входной величиной звена является давление воздуха на выходе регулятора, которое воздействует на сильфон *18* снаружи. Это звено обратной связи является реальным дифференцирующим звеном.

Рассмотрим действие ПИ-регулятора по схеме рис. 7. 48. Предположим, что от изменения регулируемой величины точка *20* переместилась вниз. Вместе с этим тяга *11* опустится и трехплечий рычаг *9* повернется по часовой стрелке, штифт *8*, находящийся на нижнем конце рычага *9*, отойдет влево и заслонка *7* под действием пружины приблизится к соплу *6*. От этого выходное давление повысится и сильфон *18* сожмется. Через жидкость давление передается малому сильфону *19*, и шток *16* переместится вправо. Как видно из рисунка, перемещение штока *16* через штифт *15*, рычаг *17*, штифт *10* и рычаг *13* передается также трехплечему рычагу *9* и, следовательно, заслонке *7*. Причем перемещение заслонки от действия обратной связи в первый момент противоположно перемещению ее от действия регулируемой величины, что уменьшает результирующее приближение заслонки к соплу.

Одновременно с описанным перемещением штока *16* начинается переток жидкости из левых сильфонов в правые. Давление жидкости в сильфонах выравнивается, и шток *16* под действием пружин перемещается влево. Скорость этого перемещения зависит от степени открытия дросселя *14* на линии перетока. Это обратное движение штока *16* протекает сравнительно медленно, вместе с ним перемещается заслонка, но уже в ту же сторону, в которую ее перемещала регулируемая величина, т. е. в направлении приближения к соплу. В этом заключается интегрирующее действие регулятора.

Когда регулируемая величина имеет заданное значение, давление жидкости в левых и правых сильфонах одинаково, шток *16* остается в покое, заслонка *7* также не движется и выходное давление не изменяется.

Если регулируемая величина, изменяясь, отводит заслонку от сопла, то выходное давление уменьшается. Обратная связь в первый момент задерживает отвод заслонки, а затем продолжает ее отводить от сопла.

Пропорциональное действие протекает лишь при изменениях регулируемой величины, в то время как интегрирующее действие протекает все то время, пока регулируемая величина не равна заданному значению, причем независимо от того, изменяется она или нет. Благодаря этому регулятор приводит регулируемую величину к заданному значению. Настройка неравномерности описанного регулятора в пределах 5—150% производится перемещением по вертикали штифта *10* винтом *12*, а настройка времени изодрома в пределах от 6 *сек* до ∞ степенью открытия дросселя *14*. Заданное

значение регулируемой величины может изменяться в пределах шкалы прибора путем перемещения точки *22* вверх или вниз на правом конце рычага *21*, чем достигается исходная установка заслонки *7* относительно сопла *6*.

Обратная связь ПИ-регулятора называется гибкой, так как она действует не только при изменении регулируемой величины, но и в тех случаях, когда регулируемая величина, отклонившись от заданного значения, не изменяется. Действие гибкой обратной связи всегда направлено в сторону возвращения регулируемой величины к заданному значению. Когда регулируемая величина имеет заданное значение, действие обратной связи прекращается.

ПИ-регулятор особенно пригоден для регулирования параметров объектов с изменяющейся нагрузкой. Плунжер регулирующего органа ПИ-регулятора для поддержания регулируемой величины на заданном значении может занимать любое положение в пределах его хода. Регулятор поддерживает регулируемую величину на заданном значении при изменениях нагрузки. График действия ПИ-регулятора при изменении нагрузки объекта имеет такой же вид, как и аналогичный график И-регулятора (см. рис. 7. 46).

Описанный пневматический ПИ-регулятор с соплом и заслонкой имеет незначительную остаточную неравномерность. Это объясняется следующим. Как было сказано, ПИ-регулятор при изменении нагрузки объекта возвращает регулируемую величину к заданному значению, переводя при этом плунжер регулирующего органа в новое положение. Для достижения этого необходимо, чтобы при заданном значении регулируемой величины заслонка по отношению к соплу занимала разные положения при неодинаковых нагрузках. Но для этого требуется, чтобы рычаг *21* (рис. 7. 48) изменил свое положение, что может быть лишь при значениях регулируемой величины, отличных от заданного. По мере приближения регулируемой величины к заданному значению действие обратной связи уменьшается, остаточная неравномерность возникает только за счет неравномерности пропорционального звена сопло — заслонка. Эта неравномерность равна тому очень небольшому изменению регулируемой величины, которое при отсутствии действия обратной связи перемещает заслонку на полный рабочий ход, и ею обычно пренебрегают.

П Д - р е г у л я т о р ы выполняются обычно непрямого действия. Звеном обратной связи является звено первого порядка с передаточной функцией (см. 7. 28)

$$W(p)_{\text{о. с}} = \frac{k_{\text{о. с}}}{Tp+1}.$$

Передаточная функция ПД-регулятора будет

$$W(p)_{\text{ПД}} = \frac{1}{k_{\text{о. с}}}(Tp+1). \tag{7.120}$$

Уравнение регулятора

$$\mu = \frac{1}{k_{о.с}}\left(\varphi + \frac{T\,d\varphi}{dt}\right).$$

Заменив $\frac{1}{k_{о.с}}$ на $\frac{1}{\delta}$ и T на T_R, получим уравнение ПД-регулятора

$$\mu = \frac{\varphi}{\delta} + \frac{T_R\,d\varphi}{\delta\,dt}, \qquad (7.121)$$

где T_R — время предварения.

Перемещения регулирующего органа ПД-регулятора пропорциональны отклонению и скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения.

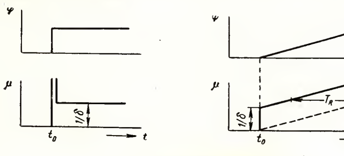


Рис. 7. 49. Переходная функция ПД-регулятора.

а — при скачкообразном изменении φ; *б* — при возрастающем непрерывном изменении φ.

Переходная функция ПД-регулятора при скачкообразном изменении входной величины ($\varphi = 1$) приведена на рис. 7. 49, *а*.

В момент начала изменения φ образуется резкий скачок выходной величины, а затем она принимает постоянное значение, равное $1/\delta$. При непрерывно возрастающем значении входной величины выходная величина изменяется, как показано на рис. 7. 49, *б*. В момент начала изменения φ выходная величина совершает скачок на $1/\delta$ и затем продолжает изменяться пропорционально изменению входной величины.

Время предварения T_R определяется как разность между одними и теми же значениями μ при включенном и полностью выключенном действии предварения по графику. Выключение действия предварения превращает ПД-регулятор в пропорциональный, характеристика которого показана на рис. 7. 49, *б* пунктиром. Как видно, выходная величина ПД-регулятора опережает выходную величину П-регулятора на время T_R.

Конструктивно ПД-регулятор пневматического действия отличается от П-регулятора лишь наличием регулируемого дросселя

на линии подачи выходного давления в камеру сильфона обратной связи (показан пунктиром на рис. 7. 43). Все остальные детали ПД-регулятора пневматического действия ничем не отличаются от деталей П-регулятора. ПД-регулятор имеет два устройства для настройки неравномерности и времени предварения.

Устройство настройки неравномерности такое же, как и в П-регуляторе. Время предварения изменяют прикрытием и открытием дросселя предварения При полностью открытом дросселе время предварения минимально, с прикрытием оно увеличивается.

Кроме ПД-регуляторов, для получения эффекта предварения применяют так называемые блоки или приставки предварения, которые включают в цепь регулирования последовательно с регуляторами. Описание блока предварения приведено ниже.

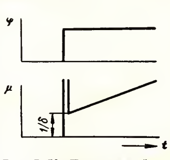


Рис. 7. 50. Переходная функция ПИД-регулятора.

ПИД-регуляторы сочетают свойства ПИ- и ПД-регуляторов. Выполняются они обычно непрямого действия. Звено обратной связи ПИД-регулятора отличается от звена обратной связи ПИ-регулятора наличием регулируемого дросселя на линии, соединяющей выход регулятора с обратной связью (показан пунктиром на рис. 7. 48). ПИД-регулятор имеет три устройства для настройки неравномерности δ, времени изодрома T_i и времени предварения T_B. Уравнение регулятора содержит пропорциональную интегральную и дифференцирующую составляющие. Оно имеет вид:

$$\mu = \frac{\varphi}{\delta} + \frac{1}{\delta T_i}\int_0^t \varphi\, dt + \frac{T_B\, d\varphi}{\delta\, dt}. \qquad (7.122)$$

График переходной функции при скачкообразном изменении входной величины ($\varphi = 1$) показан на рис. 7. 50. Он напоминает график переходной функции ПИ-регулятора, но имеет скачок выходной величины в момент изменения входной, как у ПД-регулятора. Сочетание свойств ПИ- и ПД-регуляторов делает регулятор ПИД особенно ценным для регулирования параметров объектов с большим запаздыванием и при быстро нарастающих возмущениях. Он обеспечивает поддержание регулируемой величины на заданном значении с сравнительно малыми отклонениями и малой длительностью переходных процессов. Время предварения T_B в ПИД-регуляторах можно изменять от 0 до 10 *мин*.

Двухпозиционные регуляторы. В этих регуляторах регулирующий орган может занимать только два положения —

открытое или закрытое. Перемещение происходит при достижении регулируемой величины заранее установленных пределов и протекает быстро без какой-либо зависимости от характера изменения регулируемой величины. Примером двухпозиционного регулятора может служить дилатометрический регулятор температуры (рис. 7. 51). Чувствительным элементом являются латунная трубка *1* и инваровый стержень *2*. Вследствие разности их коэффициентов теплового расширения при нагревании контакты *4* и *7* размыкаются и разрывается электрическая цепь тока, проходящего по проводам *5*. При понижении температуры контакты *4* и *7* замыкаются. Винтом *6*, прикрепленным к корпусу *3*, можно изменять заданную регулируемую температуру путем изменения начального зазора между контактами *4* и *7*. От замыкания и размыкания контактов включается и вы-

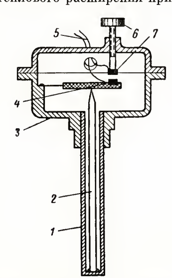


Рис. 7. 51. Двухпозиционный регулятор температуры.

1 — латунная трубка; *2* — инваровый стержень; *3* — корпус; *4* и *7* — контакты; *5* — провода; *6* — винт настройки задания.

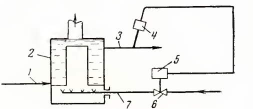


Рис. 7. 52. Схема регулирования температуры воды двухпозиционным регулятором.

1 — линия входа воды; *2* — котел водогрейный; *3* — линия выхода воды; *4* — регулятор; *5* — электрический привод; *6* — регулирующий орган; *7* — линия входа газа.

ключается электродвигатель привода регулирующего органа (на схеме не показан). Благодаря такому действию регулируемая температура все время колеблется около заданного значения. Если нагрузка объекта изменяется, то двухпозиционный регулятор не может поддерживать даже одинаковое среднее значение регулируемой величины. Для пояснения этого обратимся к рис. 7. 52. Регулятор *4* должен поддерживать заданную температуру горячей воды в линии выхода *3* из водогрейного котла *2*. Вода поступает по линии *1* в котел непрерывно и нагревается топливным газом, поступающим по трубе *7*. Регулирующий орган *6* имеет электрический привод *5*. Предположим, что регулятор настроен на замыкание контакта при температуре 80° С и размыкание при 76° С. При нормальной на-

грузке объекта регулируемая температура колеблется с одинаковыми отклонениями относительно заданного значения, которое в данном случае составляет 78° С (рис. 7. 53). При этом регулирующий орган одинаковое время находится в открытом и закрытом положениях. После увеличения нагрузки, например от увеличения потока воды (верхний график), в момент t_1 среднее значение регулируемой температуры понизилось. Температура в сторону повышения стала

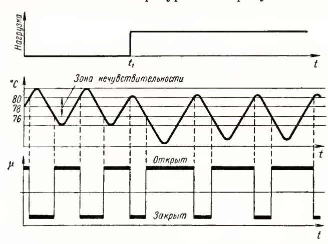


Рис. 7. 53. График действия двухпозиционного регулятора при изменениях нагрузки.

изменяться меньше, а в сторону понижения больше. Регулирующий орган находится больше в открытом положении, чем в закрытом.

Промежуток между нижним и верхним значениями регулируемой величины, при которых происходит срабатывание регулирующего органа, называется зоной нечувствительности. Обычно в двухпозиционных регуляторах эту зону можно изменять в достаточно широких пределах.

У трехпозиционных регуляторов регулирующий орган может занимать три положения: открытое, закрытое и среднее. Среднее положение поддерживается также в некоторой зоне нечувствительности. При достижении регулируемой величиной пределов зоны нечувствительности регулирующий орган переходит в закрытое или открытое положение. График изменения положения регулирующего органа трехпозиционного регулятора при постоянной нагрузке показан на рис. 7. 54. Трехпозиционный регулятор также не поддерживает регулируемую величину на заданном значении при изменениях нагрузки.

Несмотря на указанные недостатки, двух- и трехпозиционные регуляторы применяются в промышленности для регулирования параметров объектов с мало изменяющейся нагрузкой.

Из рассмотренных выше регуляторов в настоящее время наибольшее распространение получили П- и ПИ-регуляторы. И-регуляторы прямого действия применяются лишь для регулирования да-

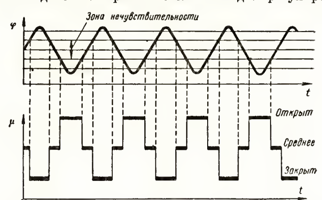


Рис. 7. 54. График действия трехпозиционного регулятора.

вления. И-регуляторы непрямого действия пневматические не изготовляют. ПД- и ПИД-регуляторы встречаются сравнительно редко. Чаще применяют блоки предварения совместно с П- и ПИ-регуляторами.

В ряде случаев П- и ПИ-регуляторы используются как двухпозиционные, для чего их пределы пропорциональности уменьшают путем настройки до величины менее 5%.

§ 7. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Переходные процессы системы регулирования описываются дифференциальными уравнениями, которые получаются при совместном решении уравнений объекта и регулятора. Как было показано, возмущения, например изменения в подаче или расходе какого-либо вида вещества или энергии в объекте, создают возможность возникновения колебаний регулируемой величины. Эти колебания могут быть расходящимися, амплитуда которых все время увеличивается. От действия возмущений отклонение регулируемой величины может протекать и без колебаний — монотонно. В этих случаях система регулирования неустойчива, регулируемая величина не поддерживается на заданном значении.

К неустойчивым системам относятся и такие, у которых после нанесения возмущения регулируемая величина совершает неогра-

ниченно долго не затухающие колебания с постоянной амплитудой.

Колебания могут иметь затухающий характер. Может быть случай, когда после отклонения регулируемая величина снова принимает постоянное значение без колебаний. Это значит, что система устойчива.

При выборе типа регулятора, учитывая свойства объекта, необходимо прежде всего установить, будет ли данная система устойчива.

Устойчивой называется система, имеющая свойство возвращаться к состоянию установившегося равновесия после устранения возмущения, нарушившего равновесие.

Устойчивость линейной системы автоматического регулирования не зависит от величины начального возмущения и характеризуется свободным движением после снятия возмущения.

В замкнутой системе (рис. 7. 55), состоящей из объекта и регулятора, для поддержания регулируемой величины на заданном значении необходимо, чтобы увеличение или уменьшение регулируемой величины вызывало такое воздействие регулятора, которое было бы направлено соответственно к ее уменьшению или увеличению. В такой системе регулятор является отрицательной обратной связью по отношению к объекту.

Рис. 7. 55. Структурная схема систем автоматического регулирования без внешних возмущающих воздействий.

О — объект регулирования; *Р* — регулятор.

При отсутствии внешних воздействий выходная регулируемая величина объекта является входной величиной регулятора, а выходная величина регулятора входной величиной объекта.

Если исходить из предыдущего, передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p)_{\text{о}} = \frac{x_{\text{вых. о}}}{x_{\text{вх. о}}},$$

передаточная функция регулятора

$$W(p)_{\text{р}} = \frac{x_{\text{вых. р}}}{x_{\text{вх. р}}}.$$

Из этих двух уравнений получаем

$$x_{\text{вх. о}} W(p)_{\text{о}} = x_{\text{вых. о}}$$

и

$$x_{\text{вх. р}} W(p)_{\text{р}} = x_{\text{вых. р}}.$$

Но так как

$$x_{\text{вх. о}} = x_{\text{вых. р}},$$

то

$$x_{\text{вх. р}} W(p)_{\text{р}} W(p)_{\text{о}} - x_{\text{вых. о}} = 0.$$

По условию принимаем

$$x_{\text{вх. р}} = x_{\text{вых. о}} = x$$

и получаем уравнение одноконтурной замкнутой системы при отсутствии внешнего возмущения:

$$[W(p)_{\text{р}} W(p)_{\text{о}} - 1]\, x = 0. \qquad (7.123)$$

Воздействие регулятора на объект направлено в сторону уменьшения отклонения регулируемой величины от заданного значения. Это учитывается тем, что передаточная функция регулятора в уравнении (7. 123) должна входить со знаком минус.

Формула (7. 123) дает возможность получить уравнение системы по известным передаточным функциям объекта и регулятора.

Так, например, уравнение системы, состоящей из объекта первого порядка с самовыравниванием и П-регулятора, получаем путем подстановки в (7. 123) передаточных функций из (7. 88), (7. 109) и (7. 110):

$$\left(-k_{\text{р}} \frac{\varepsilon}{p - \varepsilon\varrho} - 1\right) x = 0,$$

откуда

$$px + (k_{\text{р}}\,\varepsilon + \varepsilon\varrho)\, x = 0.$$

Или, обозначая величины, стоящие перед x, через коэффициенты a_0 и a_1, имеем

$$a_0 px + a_1 x = 0. \qquad (7.124)$$

Для системы, состоящей из объекта второго порядка и ПИ-регулятора, пользуясь передаточными функциями из (7. 100) и (7. 118), получим

$$\left(-\frac{1 + T_i p}{\delta\, T_i p} \cdot \frac{k_0}{T^2 p^2 + 2Tp + 1} - 1\right) x = 0$$

и после преобразования

$$\delta\, T_i T^2 p^3 x + \delta\, T_i 2T p^2 x + (k_0 + \delta)\, T_i p x + k_0 x = 0.$$

Или, вводя обозначения коэффициентов через a_0, a_1, a_2 и a_3, имеем

$$a_0 p^3 x + a_1 p^2 x + a_2 px + a_3 x = 0. \qquad (7.125)$$

Уравнение системы из объекта нулевого порядка и П-регулятора имеет вид:

$$a_0 x = 0. \qquad (7.126)$$

Ряд систем из объектов первого и второго порядков и П-, ПД-, ПИ- и ПИД-регуляторов имеют уравнения вида:

$$a_0p^2x + a_1px + a_2x = 0. \qquad (7.127)$$

В общем виде уравнение свободного движения линейной системы автоматического регулирования имеет вид:

$$(a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n)\, x = 0 \qquad (7.128)$$

и его характеристическое уравнение

$$a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n = 0. \qquad (7.129)$$

Корни этого уравнения могут быть вещественными (положительными, отрицательными или равными нулю) или комплексными, у которых вещественная часть может быть положительной, отрицательной или равной нулю.

Если все корни уравнения различны, то общее решение дифференциального уравнения (7. 128) имеет вид:

$$x = A_1 e^{p_1t} + \ldots + A_n e^{p_nt} = \sum_{k=1}^{k=n} Ak\, e^{p_kt}, \qquad (7.130)$$

где A_1, A_2, ..., A_n — постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий.

Если величина x при $t \to \infty$ стремится к нулю, то система регулирования, описываемая уравнением (7. 128), устойчива. Если же величина x неограниченно растет или совершает незатухающие колебания при $t \to \infty$, то система регулирования неустойчива.

Величина x стремится с течением времени к нулю, а следовательно, система устойчива в том случае, если все вещественные корни характеристического уравнения (7. 129) отрицательны, а все комплексные корни имеют отрицательную вещественную часть. Если хотя бы один из корней характеристического уравнения вещественный положительный или комплексный с положительной вещественной частью, то система неустойчива.

Если все корни характеристического уравнения вещественные неравные и отрицательные, то каждое слагаемое уравнение (7. 130), а значит, и x апериодически (без колебаний) стремятся к нулю.

Если один корень характеристического уравнения равен нулю, а все остальные вещественные отрицательные или комплексные с отрицательной вещественной частью, то система будет нейтральной, т. е. такой, которая при снятии возмущения стремится к равновесию, наступающему в зависимости от величины возмущения при любых значениях выходной величины.

Если уравнение содержит пару комплексных корней с положительной действительной частью, то в системе возникают расходящиеся колебания (с непрерывно увеличивающейся амплитудой).

Если уравнение содержит пару чисто мнимых корней (комплексных, у которых вещественная часть равна нулю), то в системе возникают незатухающие гармонические колебания с постоянной амплитудой, зависящей от начальных условий. В последнем случае система будет находиться на грани устойчивости.

Корни характеристического уравнения (7. 129) можно изобразить в виде точек на комплексной плоскости, тогда условием устойчивости системы будет необходимость того, чтобы все корни были расположены слева от мнимой оси. Это условие устойчивости графически представлено на рис. 7. 56. Точки p_1 и p_2 расположены на отрицательной части вещественной оси и соответствуют отрицательным вещественным корням. Точки $p_{3,1}$ и $p_{3,2}$, а также $p_{4,1}$ и $p_{4,2}$ соответствуют двум парам комплексных корней, вещественная часть которых отрицательна. Если хотя бы один корень вещественный или пара комплексных корней будет находиться справа от мнимой оси, то система неустойчива. Если на мнимой оси будет расположена хотя бы одна пара мнимых корней $p = \pm j\omega$, то система находится на границе устойчивости.

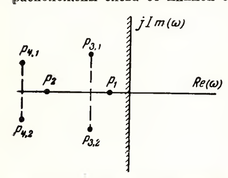


Рис. 7. 56. Графическое изображение условия устойчивости системы.

Значение корней зависит от коэффициентов $a_0, \ldots, a_n$ характеристического уравнения, которые включают в себя параметры регулятора и объекта. В зависимости от значений этих коэффициентов корни характеристического уравнения для некоторых систем могут перемещаться из левой полуплоскости в правую, переходя границу устойчивости — мнимую ось.

Итак, для определения устойчивости системы необязательно находить корни характеристического уравнения, достаточно убедиться, все ли они расположены в левой части комплексной плоскости.

Рассмотрим сначала несколько примеров исследования устойчивости системы по уравнениям до второго порядка, корни которых можно определить алгебраически.

1. Система состоит из объекта первого порядка с самовыравниванием и П-регулятора. Характеристическое уравнение системы

$$p + (k_p \varepsilon + \varepsilon\varrho) = 0,$$

откуда

$$p = -(k_p \varepsilon + \varepsilon\varrho).$$

Уравнение имеет один отрицательный корень. Следовательно, система устойчива при любых значениях k_p, ε и ϱ.

2. Система состоит из объекта первого порядка без самовыравнивания и И-регулятора.

Передаточная функция объекта

$$W(p)_o = \frac{\varepsilon}{p}.$$

Передаточная функция И-регулятора (берем со знаком минус)

$$W(p)_p = -\frac{1}{T_s p}.$$

Уравнение системы из (7.123)

$$T_s p^2 x - \varepsilon x = 0.$$

Характеристическое уравнение системы

$$T_s p^2 - \varepsilon = 0.$$

Корни этого уравнения

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon}{T_s}}.$$

Поскольку один из корней является вещественным и положительным, то система неустойчива для любых значений ε и T_s.

3. Система состоит из объекта первого порядка без самовыравнивания и П-регулятора.

Передаточная функция объекта

$$W(p)_o = \frac{\varepsilon}{p}.$$

Передаточная функция регулятора (берем со знаком минус)

$$W(p)_p = -k_p.$$

Уравнение системы

$$px + k\varepsilon x = 0.$$

Характеристическое уравнение системы

$$p + k\varepsilon = 0.$$

Корень уравнения

$$p = -k_p \varepsilon.$$

Система устойчива при всех значениях k_p и ε.

4. Система состоит из объекта второго порядка и П-регулятора.

Передаточная функция объекта

$$W(p)_o = \frac{k_o}{T^2p^2 + 2Tp + 1}.$$

Передаточная функция регулятора (берем со знаком минус)

$$W(p)_p = -k_p.$$

Уравнение системы

$$T^2p^2x + 2Tpx + (k_p k_o + 1)x = 0.$$

Характеристическое уравнение системы

$$T^2p^2+2Tp+(k_pk_o+1)=0.$$

Перепишем это уравнение, освободившись от коэффициента при p^2:

$$p^2+\frac{2p}{T}+\frac{k_pk_o+1}{T^2}=0.$$

Корни этого уравнения

$$p_{1,2}=-\frac{1}{T}\pm\sqrt{\frac{1}{T^2}-\frac{k_pk_o+1}{T^2}}$$

или

$$p_{1,2}=-\frac{1}{T}\pm\frac{1}{T}\sqrt{-k_pk_o}.$$

Оба корня комплексные с отрицательной вещественной частью. Следовательно, система устойчива при всех значениях k_p и k_o.

5. Система состоит из объекта первого порядка с самовыравниванием и ПИ-регулятора.

Передаточная функция объекта

$$W_s(p)_o=\frac{\varepsilon}{p+\varepsilon\varrho}.$$

Передаточная функция регулятора (берем со знаком минус)

$$W(p)_p=-\frac{1+T_ip}{\delta T_ip}.$$

Уравнение системы

$$\delta T_ip^2x+(1+\delta\varrho)\varepsilon T_ipx+\varepsilon x=0.$$

Характеристическое уравнение

$$\delta T_ip^2+(1+\delta\varrho)\varepsilon T_ip+\varepsilon=0$$

или после освобождения от коэффициента при p^2

$$p^2+\frac{(1+\delta\varrho)\varepsilon}{\delta}p+\frac{\varepsilon}{\delta T_i}=0.$$

Корни уравнения

$$p_{1,2}=-\frac{(1+\delta\varrho)\varepsilon}{2\delta}\pm\sqrt{\frac{(1+\delta\varrho)^2\varepsilon^2}{4\delta^2}-\frac{\varepsilon}{\delta T_i}}.$$

Корни этого уравнения могут быть вещественными отрицательными и комплексными, сопряженными с отрицательной вещественной частью. В первом случае система устойчива и переходный процесс (после снятия возмущения) протекает апериодически, а во втором случае также устойчива, но процесс протекает с затухающими колебаниями.

Можно рассмотреть любое сочетание из рассмотренных типов объектов и регуляторов и определить устойчивость системы. Из

примеров видно, что устойчивость системы зависит от величины коэффициентов, характеризующих параметры объекта и регулятора. Отсюда имеется возможность найти расчетным способом значение параметров настройки регулятора (значения k_p, δ и T_i), при которых система находится еще в устойчивом состоянии. Это относится и ко всем другим системам регулирования.

Так как найти корни уравнений выше второго порядка трудно, пользуются так называемыми критериями устойчивости, которыми определяются условия расположения корней в левой части комплексной плоскости. Эти условия находят из соотношений между коэффициентами характеристического уравнения системы.

Критерий Рауса. Не приводя вывода, укажем лишь на условия устойчивости, вытекающие из критерия Рауса. Для систем, имеющих характеристическое уравнение второй степени:

$$a_0p^2 + a_1p + a_2 = 0,$$

условие устойчивости — все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительными:

$$a_0 > 0, \quad a_1 > 0, \quad a_2 > 0. \tag{7.131}$$

Для систем, имеющих характеристическое уравнение третьей степени:

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0,$$

условия устойчивости — все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительными и

$$a_1a_2 - a_0a_3 > 0. \tag{7.132}$$

Для систем, имеющих характеристические уравнения четвертой степени:

$$a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4 = 0,$$

условия устойчивости — все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительными и

$$(a_1a_2 - a_0a_3)\,a_3 - a_1^2a_4 > 0. \tag{7.133}$$

Пример. Характеристическое уравнение системы, состоящей из объекта второго порядка и ПИ-регулятора:

$$\delta\, T_iT^2p^3 + \delta\, T_i2Tp^2 + (k_o + \delta)\, T_ip + k_o = 0.$$

Для устойчивости этой системы необходимо, чтобы все коэффициенты были положительными, что соблюдается, и

$$\delta\, T_i2T\,(k_o + \delta) - \delta\, T_iT^2k_o > 0.$$

Последнее условие может быть выполнено подбором соответствующих величин δ, T_i, T и k_0.

Критерий И. А. Вышнеградского относится к системам, описываемым дифференциальными уравнениями третьего порядка. Уравнение путем деления коэффициентов на a_0 преобразовывается так, чтобы коэффициент при p^3 был равен единице. Характеристическое уравнение такой системы будет

$$p^3+a_1p^2+a_2p+a_3=0. \qquad (7.134)$$

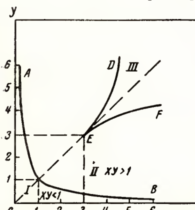


Рис. 7. 57. Диаграмма И. А. Вышнеградского.

И. А. Вышнеградским были введены следующие обобщающие коэффициенты:

$$X=\frac{a_1}{\sqrt[3]{a_3}}, \quad Y=\frac{a_2}{\sqrt[3]{a_3^2}}.$$

Для предельного случая, когда система находится на границе устойчивости, т. е. когда уравнение (7. 134) имеет один отрицательный вещественный корень и пару сопряженных комплексных корней без вещественной части,

$$XY=1.$$

При $XY<1$ система будет неустойчивой, а при $XY>1$ устойчивой. Пользуясь этими условиями, И. А. Вышнеградский построил диаграмму на плоскости с координатами X и Y (рис. 7. 57). Кривая AB представляет собой равнобокую гиперболу, которую строят по уравнению $XY=1$. Эта кривая определяет границу между областью неустойчивости I и областью устойчивости II. В области II один из корней характеристического уравнения (7. 134) вещественный отрицательный и два других сопряженные комплексные с отрицательной вещественной частью. Уравнение, имеющее такие корни, описывает затухающий колебательный процесс.

Если все три корня характеристического уравнения (7. 134) вещественные отрицательные и разные, то переходный процесс затухающий апериодический. Этому условию соответствует неравенство

$$4(X^3+Y^3)-X^2Y^2-18XY+27<0. \qquad (7.135)$$

Решая это уравнение, приравняв его нулю, для положительных X и Y, получают точки пограничной кривой DEF, ветви которой DE и EF симметричны биссектрисе координатного угла.

В точке $X = Y = 3$ все три корня равны между собой. Значения X и Y внутри кривой DEF в области III соответствуют затухающему апериодическому процессу.

Амплитудно-фазовый критерий устойчивости. Этот критерий позволяет судить об устойчивости замкнутой системы регулирования по ее амплитудно-фазовой характеристике в разомкнутом состоянии. Разомкнутую систему, состоящую из объекта регулирования и регулятора, можно представить себе как систему, состоящую из двух последовательно соединенных звеньев. Получают такую систему размыканием связи между регулятором и объектом, например отключением от регулятора чувствительного элемента измерительного устройства (термопары, диафрагмы расходомера и т. п.).

Для применения амплитудно-фазового критерия устойчивости необходимо иметь амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы. Последнюю определяют аналитическим путем из выражения для передаточной функции разомкнутой системы. Однако, чтобы не прибегать к сложным вычислениям, амплитудно-фазовую характеристику простой разомнутой системы, состоящей из объекта и регулятора, можно получить еще так.

Находят аналитическое выражение амплитудно-фазовых характеристик объекта и регулятора и для разных значений частот (от 0 до $+\infty$), определяют модули и аргументы векторов комплексной переменной. По полученным данным вычисляют величины модулей $A\ (\omega)_c$ и аргументов θ_c для системы. Причем модуль $A\ (\omega)_c$ находят умножением модулей, а аргумент θ_c сложением аргументов объекта и регулятора (пример вычислений приведен в § 11 главы 7).

Амплитудно-фазовый критерий устойчивости гласит: если система в разомкнутом состоянии устойчива, то для устойчивости этой же системы в замкнутом состоянии необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика системы в разомкнутом состоянии не охватывала точку с координатами $-1,\ j0$ при изменениях частоты от $-\infty$ до $+\infty$.

На рис. 7. 58, *а* приведена амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой устойчивой системы, которая устойчива и в замкнутом состоянии, так как она не охватывает точку $-1,\ j0$, а на рис. 7. 58, *б* — амплитудно-фазовая характеристика устойчивой системы в разомкнутом, но неустойчивой в замкнутом состоянии.

Амплитудно-фазовые характеристики обычно строят лишь для интервала частот от 0 до $+\infty$. В области отрицательных частот амплитудно-фазовая характеристика симметрична и зеркально отражает первую относительно вещественной оси.

Амплитудно-фазовый критерий дает возможность определить условия устойчивости еще и таких систем, которые в разомкнутом

состоянии неустойчивы. Однако в данной книге этот вопрос не рассматривается.

Применение регуляторов. В практике автоматического регулирования применение П-регулятора с объектами первого и второго порядков обеспечивает устойчивое регулирование. Недостатком таких систем является остаточное отклонение регулируемой величины при колебаниях нагрузки объекта.

И-регулятор в сочетании с объектом первого порядка с самовыравниванием работает устойчиво, с объектом же без самовыравнивания неустойчиво с незатухающими колебаниями. ПИ-регулятор для устойчивой работы требует правильной настройки δ и T_i. Во

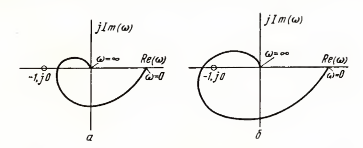


Рис. 7. 58. Амплитудно-фазовая характеристика устойчивой (*а*) и неустойчивой (*б*) замкнутых систем.

многих случаях системы из объектов первого и второго порядков с ПИ-регуляторами работают с незатухающими колебаниями. ПИ-регуляторы пригодны для работы с объектами, имеющими значительное запаздывание. Применение ПД- и ПИД-регуляторов в объектах первого и второго порядков с запаздыванием наиболее целесообразно. Они обеспечивают устойчивое регулирование без остаточного отклонения регулируемой величины.

В объектах нулевого порядка применение ПД- и ПИД-регуляторов неприемлемо. Они создают неустойчивый процесс, часто переходящий в расходящийся колебательный. Существуют регуляторы с так называемым обратным предварением, в которых воздействие от первой производной имеет отрицательный знак. Эти регуляторы создают задержку в перемещении регулирующего органа при увеличениях скорости изменения регулируемой величины. Такие регуляторы применяются в объектах нулевого порядка, каким является, например, короткий участок трубопровода, в котором регулируется расход или давление жидкости, и регулирующий орган устанавливают на линии входа.

§ 8. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В зависимости от свойств объектов и регуляторов, а также и от характера и величины возмущения процессы регулирования могут протекать различно. Для оценки качества регулирования в практике обычно прибегают к рассмотрению кривых записи переходных процессов после нанесения скачкообразного возмущения. Качество процесса регулирования тем лучше, чем меньше отклоняется регулируемая величина от заданного значения, чем скорее затухают колебания, если они возникли, и чем скорее регулируемая величина снова принимает заданное или новое постоянное значение. Виды основных возможных переходных процессов приведены на рис. 7. 59, из которых процессы *а*, *б*, *в* и *г* устойчивые. Процесс *д* — колебательный незатухающий — относится к числу неустойчивых, однако он часто встречается в практике и при малых амплитудах колебаний вполне приемлем. Другие неустойчивые процессы (на рис. 7.59 не показаны) — расходящиеся — характерны тем, что у них регулируемая величина после возмущения отклоняется все больше и больше от заданного значения в виде колебаний с нарастающей амплитудой или монотонно. Неустойчивые расходящиеся процессы в практике автоматического регулирования совершенно неприемлемы.

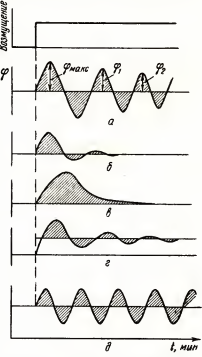


Рис. 7. 59. Виды основных переходных процессов.

а и *б* — колебательные затухающие; *в* — апериодический; *г* — колебательный затухающий с остаточным отклонением регулируемого параметра; *д* — колебательный незатухающий.

Процесс *а* — колебательный — затухает медленно. Процесс *б* — тоже колебательный, но затухает быстро. Процесс *в* — апериодический. Все эти три процесса характерны тем, что регулируемая величина возвращается к заданному значению, что может быть достигнуто лишь И-, ПИ- и ПИД-регуляторами.

Процесс *г* — колебательный затухающий с остаточным отклонением. Регулируемая величина не возвращается к заданному, а принимает новое постоянное значение. Такой процесс характерен для случая применения П- и ПД-регуляторов.

Процесс *д* — колебательный незатухающий — характерен для случая применения И-регулятора с объектами без самовыравнивания.

Важным показателем качества регулирования является еще величина максимального отклонения параметра. Существуют технологические процессы, в которых не допускается даже кратковременное возрастание (или уменьшение) регулируемой величины больше определенного значения. Наименьшее отклонение при прочих равных условиях достигается при работе с ПД- и ПИД-регуляторами.

Принципиально возможно определить качество регулирования системы теоретически. Для этого необходимо составить дифференциальное уравнение системы, решить его и построить кривую переходного процесса. Однако ввиду того, что практические системы регулирования состоят из многих звеньев, имеющих заметную нелинейность, применение линейных уравнений требует поправок и введения соответствующих коэффициентов. Решение таких уравнений сложно и громоздко. Поэтому, не рассматривая этот вопрос, мы ограничимся лишь указаниями на принцип одного из аналитических критериев оценки качества процесса регулирования по его переходной кривой, которая может быть построена экспериментально и теоретически. Критерий этот называется интегральным и в простейшем виде выражается интегралом

$$I_0 = \int_0^\infty \varphi \, dt, \tag{7.136}$$

где φ — величина отклонения регулируемой величины от заданного значения;

t — время.

Интеграл I_0 определяет величину площади, описываемой кривой переходного процесса для систем без перерегулирования, т. е. таких, в которых регулируемая величина, изменяясь, не пересекает заданного или нового установившегося значения (рис. 7. 59, *в*).

Для систем с перерегулированием (рис. 7. 59, *а*, *б*, *г* и *д*) интеграл для оценки качеств регулирования имеет вид:

$$I_1 = \int_0^\infty \varphi^2 dt. \tag{7.137}$$

Этот интеграл учитывает площади (заштрихованные на рис. 7. 59, *а*, *б*, *г*, *д*), описываемые кривой переходного процесса и расположенные выше и ниже установившегося значения.

Чем меньше значение интегралов I_0 и I_1, тем качественнее протекает процесс регулирования.

Важным показателем качеств колебательных процессов регулирования является величина степени затухания, определяемая по уравнению

$$\Psi = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \tag{7.138}$$

как отношение разности двух соседних (положительных или отрицательных) амплитуд к первой из них.

Если $\varphi_1 = \varphi_2$, то $\Psi = 0$ — процесс незатухающий. Если $\varphi_2 = 0$, то $\Psi = 1$ — процесс апериодический (неколебательный). При $0 < \varphi_2 < \varphi_1$ процесс затухающий колебательный.

Если дифференциальное уравнение колебательного переходного процесса известно и в общем виде может быть представлено как

$$a_2 \varphi'' + a_1 \varphi' + a_0 \varphi = 0,$$

то затухание характеризуется логарифмическим декрементом затухания α, величина которого равна

$$\alpha = \frac{a_1}{2a_2}. \tag{7.139}$$

Поскольку коэффициенты a_2 и a_1 уравнений системы содержат величины δ, T_i и $T_к$, то, определив α, можно найти их значения, соответствующие большему декременту затухания, т. е. такие, при которых затухание будет максимальным. Это дает возможность теоретически определить оптимальные настройки регулятора, обеспечивающие лучшее качество процесса регулирования.

§ 9. МНОГОКОНТУРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Описанные выше системы регулирования были одноконтурными состоящими из одного регулируемого объекта и одного регулятора. Существуют сложные системы, состоящие больше чем из одного замкнутого контура. Часто встречается в практике двухконтурная система с вспомогательной регулируемой величиной (рис. 7. 60, *а*). Входной величиной системы является изменение в подаче пара через клапан *6*, а выходной — температура x в баке *2*, являющаяся также основной регулируемой величиной, поддерживаемой постоянной. Вспомогательной регулируемой величиной $x_в$ является температура горячей воды на входе в водяную рубашку. Основной регулятор $R_о$ изменяет задание вспомогательного регулятора $R_в$. Регулирующее воздействие y вспомогательного регулятора управляет регулирующим клапаном на линии подачи греющего пара в теплообменник. Возмущающим воздействием z данной системы является непредвиденное изменение давления пара, вследствие чего может изменяться его количество, поступающее в теплообменник.

Как видно, вспомогательная регулируемая величина является выходной для контура, состоящего лишь из части звеньев системы регулирования, в который не входит емкость бака. Основная же регулируемая величина x — выходная для контура, в который входят все звенья системы.

Вспомогательная регулируемая величина быстрее реагирует на изменения в подаче пара в теплообменник, чем основная на

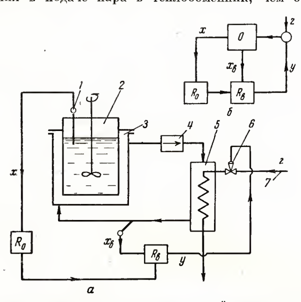


Рис. 7. 60. Система регулирования с вспомогательной регулируемой величиной.

а — технологическая схема; *б* — структурная схема; *1* — термопара; *2* — бак с подогреваемой жидкостью; *3* — вода; *4* — насос для воды; *5* — теплообменник; *6* — регулирующий клапан; *7* — линия водяного пара; *О* — объект регулирования; R_0 — регулятор основной; $R_в$ — регулятор вспомогательный; x — основная регулируемая величина; $x_в$ — вспомогательная регулируемая величина; y — регулирующее воздействие; z — возмущающее воздействие.

изменения в подаче воды в бак. Последнее обстоятельство и создает более устойчивую систему регулирования. Если бы основной регулятор непосредственно воздействовал на клапан, то система была бы менее устойчивой из-за больших запаздываний в изменениях величины x при изменениях в подаче пара.

Системы с вспомогательной регулируемой величиной называются еще к а с к а д н ы м и. Величины x и $x_в$ могут быть различными.

Например, можно осуществить каскадную схему регулирования температуры x жидкости на выходе из теплообменника путем регулирования расхода $x_в$ греющего пара с воздействием на него от температуры жидкости (рис. 7. 61). И в этом случае контур регулирования расхода имеет меньшее запаздывание, чем контур, в котором

регулируется температура. Во всех схемах с вспомогательной регулируемой величиной основной регулятор лишь корректирует действие вспомогательного регулятора.

К числу многоконтурных относятся также системы многосвязанного регулирования.

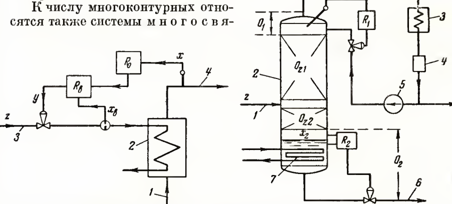


Рис. 7. 61. Схема регулирования температуры жидкости, подогреваемой в теплообменнике.

1 — линия входа подогреваемой жидкости; 2 — теплообменник; 3 — линия входа греющего пара; 4 — линия выхода подогретой жидкости; R_0 — регулятор основной; $R_в$ — регулятор вспомогательный; x — основная регулируемая величина; $x_в$ — вспомогательная регулируемая величина; y — регулирующее воздействие; z — возмущающее воздействие.

Рис. 7. 62. Схема регулирования ректификационной колонны.

1 — линия ввода сырья; 2 — колонна; 3 — холодильник; 4 — сборник верхнего продукта; 5 — насос подачи орошения; 6 — линия выхода нижнего продукта; 7 — змеевик с паром; O_1 и O_2 — объекты первый и второй; R_1 и R_2 — регуляторы; O_{z1} и O_{z2} — связывающие звенья; x_1 и x_2 — регулируемые параметры.

В этих системах регулируется не одна, а несколько величин, связанных между собой общим технологическим процессом и зависимых друг от друга. Примером многосвязанного регулирования может служить схема регулирования двух параметров ректификационной колонны (рис. 7. 62). В этой

Рис. 7. 63. Структурная схема многосвязанного регулирования ректификационной колонны.

x_1 — температура верха колонны; x_2 — уровень жидкости в нижней части колонны; O_1 — объект первый (верхняя часть колонны); O_2 — объект второй (нижняя часть колонны); R_1 и R_2 — регуляторы температуры и уровня; K_{12} и K_{21} — звенья, связывающие объекты через входные и выходные величины; O_{z1} и O_{z2} — звенья, связывающие объекты по внешнему воздействию, — секции колонны; z — внешнее воздействие — подача сырья.

колонне регулируется температура верха x_1 подачей холодного орошения и уровень жидкости x_2 в нижней части. Изменения каждой из этих величин взаимно влияют друг на друга. Такую систему можно рассматривать как состоящую из двух отдельных объектов регулирования, но связанных между собой. Структурная схема такой системы приведена на рис. 7. 63.

При уменьшении подачи орошения повышается температура верха колонны, и это вызывает понижение уровня x_2 жидкости в ее нижней части (при неизменной подаче тепла через змеевик). При уменьшении подачи сырья z температура верха повышается, а уровень понижается.

Существуют многоконтурные системы, в которых регулируется более чем два параметра, например паровые котлы.

§ 10. САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

При автоматическом регулировании можно наблюдать, что величина параметра, поддерживаемого на заданном значении, перестает удовлетворять требованиям технологического процесса. Так, например, постоянство температуры верха ректификационной колонны не всегда соответствует постоянству состава паров, выходящих из колонны, и оператор вынужден периодически изменять задание регулятора, пользуясь данными лабораторного анализа верхнего продукта. Объяснить это можно не только изменением состава сырья на входе в колонну, но и влиянием внешних возмущений, например повышением или понижением окружающей температуры, вследствие чего изменяются потери тепла, изменением атмосферного давления и т. п.

Значение регулируемой величины, отвечающей требованиям технологического процесса для получения необходимого качества того или иного продукта, называют оптимальным. Величина оптимального значения, очевидно, может изменяться и от влияния внешних возмущений, воздействующих на систему регулирования.

В идеальном случае можно представить себе такую систему регулирования, в которой поддерживалось бы оптимальное значение параметра при всех возможных внешних возмущениях. Она отличалась бы от обычных тем, что регулируемая величина не оставалась всегда постоянной и была оптимальной для данного процесса. Для этого необходимо, чтобы регулятор этой системы мог самонастраиваться на новые, оптимальные значения регулируемой величины. Системы регулирования, которые автоматически находят оптимальное значение регулируемой величины, называются самонастраивающимися, а их регуляторы оптимальными.

Самонастраивающимся системам принадлежит будущее автоматического регулирования. В настоящее время уже существуют регуляторы величин, оптимальное значение которых соответствует максимуму или минимуму их изменений.

Такие оптимальные регуляторы называют экстремальными. В качестве примера можно привести оптимальное количество воздуха, поступающего в топку парового котла, при котором температура горения имеет максимальное значение (рис. 7. 64, кривая A). Если количество воздуха меньше или больше значения $Q_{опт}$, то температура горения падает. При увеличении съема пара в котел подается больше топлива, максимальная температура горения повышается и оптимальное количество воздуха должно также увеличиться (кривая C). При уменьшении съема пара подача топлива уменьшается и количество воздуха должно быть уменьшено (кривая B).

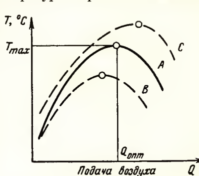


Рис. 7. 64. Зависимость между температурой топки парового котла и подачей воздуха.

Задача регулятора в системе регулирования с таким объектом состоит в поддержании оптимальной подачи воздуха в топку при различных нагрузках котла. Для определения того, достигла подача воздуха оптимального значения или нет, не требуется измерять его количество, а достаточно лишь зафиксировать экстремум, чему отвечает условие

$$\frac{dT}{dQ} = 0$$

или в общем виде

$$\frac{dx}{dy_0} = 0, \tag{7.140}$$

где x — регулируемая величина;

y_0 — регулирующее воздействие.

Экстремальный регулятор, применяемый в системе оптимального регулирования, должен поддерживать экстремум регулируемой величины. Для этого регулятор должен реагировать на отклонение регулируемой величины от экстремума и возвращать ее к нему.

Существует несколько разновидностей экстремальных регуляторов, отличающихся друг от друга способом поиска экстремума.

В нефтеперерабатывающей промышленности применение экстремальных регуляторов и вообще самонастраивающихся систем регулирования пока еще ограничено, поэтому регуляторы этого вида здесь подробно не рассматриваются.

§ 11. ПРИМЕРЫ

Пример 1. Исследовать на устойчивость систему регулирования, состоящую из объекта первого порядка с самовыравниванием и ПИ-регулятора.

Объектом является аккумулятор для сжатого воздуха (рис. 7. 65) объемом 30 $м^3$. Через аккумулятор при нормальной нагрузке непрерывно протекает 600 $м^3/ч$ воздуха (при стандартных условиях). В аккумуляторе должно поддерживаться регулятором заданное давление 3 $кГ/см^2$. Регулирующий клапан диаметром 32 *мм* установлен на линии входа воздуха в аккумулятор. Рабочий ход плунжера клапана равен 15 *мм*. При нормальной нагрузке клапан открыт на 50%, или на 7,5 *мм* хода. Характеристика регулирующего кла-

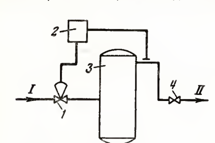


Рис. 7. 65. Схема системы регулирования, состоящей из объекта первого порядка с самовыравниванием и ПИ-регулятора.

1 — регулирующий клапан; *2* — регулятор; *3* — аккумулятор воздуха; *4* — задвижка; *I* — линия входа воздуха; *II* — линия выхода воздуха.

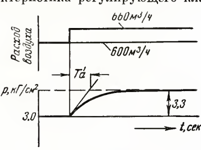


Рис. 7. 66. Кривая разгона (переходная функция) объекта первого порядка с самовыравниванием.

пана линейная. Перед клапаном поддерживается более высокое давление, обеспечивающее критический перепад на клапане ($p_2 < 0,5\ p_1$). Запаздывание объекта очень мало, и его в расчет не принимать.

Для определения величин ε и ϱ, характеризующих свойства объекта, была снята кривая разгона при изменении нагрузки на 10% от нормальной (рис. 7. 66). Расход воздуха увеличивался на 60 $м^3/ч$ путем скачкообразного частичного открытия регулирующего клапана при отключенном регуляторе. Таким образом, $\mu = 0,1$. Давление в аккумуляторе при этом повысилось с 3 до 3,3 $кГ/см^2$; следовательно,

$$\varphi = \frac{0,3}{3} = 0,1.$$

По экспериментальной кривой разгона определили $T'_a = 7$ *сек*. Из (7. 89) находим время разгона T_a при 100%-ном изменении нагрузки:

$$T_a = \frac{T'_a}{\mu} = \frac{7}{0,1} = 70 \text{ сек}.$$

Скорость разгона из (7 84)

$$\varepsilon = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{70} = 0,0142.$$

Коэффициент усиления объекта

$$k_0 = \frac{\varphi}{\mu} = \frac{0,1}{0,1} = 1.$$

Степень самовыравнивания из (7.87)

$$\varrho = \frac{1}{k_0} = 1.$$

Передаточная функция объекта из (7.88)

$$W(p)_0 = \frac{\varepsilon}{p + \varepsilon\varrho} = \frac{0,0142}{p + 0,0142}.$$

Неравномерность регулятора δ принимаем равной 0,2 (20%). Время изодрома T_i принимаем равным 60 *сек*. Обе эти величины являются настроечными параметрами, и их можно изменять при наладке работы регулятора. Тогда передаточная функция ПИ-регулятора из (7. 118) будет (берем со знаком минус)

$$W(p)_\text{р} = -\frac{1 + 60p}{0,2 \cdot 60p} = -\frac{1 + 60p}{12p}.$$

Находим уравнение одноконтурной замкнутой системы регулирования из (7. 123):

$$\left(-\frac{1 + 60p}{12p} \frac{0,0142}{p + 0,0142} - 1\right) x = 0.$$

После преобразования имеем

$$12p^2x + 1,022px + 0,0142x = 0.$$

Характеристическое уравнение

$$12p^2 + 1,022p + 0,0142 = 0$$

или

$$p^2 + 0,085p + 0,00118 = 0.$$

Находим корни этого уравнения:

$$p_1 = -0,0175,$$

$$p_2 = -0,0675.$$

Оба корня вещественные отрицательные. Следовательно, система устойчива. Переходный процесс протекает апериодически, без колебаний.

Если изменить настройку регулятора, приняв, например, $\delta = 0,1$ (10%) и $T_i = 20$ *сек*, то характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$0,1 \cdot 20p^2 + (1 + 0,1 \cdot 1)\, 0,0142 \cdot 20p + 0,0142 = 0.$$

Корни этого уравнения:

$$p_1 = -0{,}0781 + j \cdot 0{,}0316,$$

$$p_2 = -0{,}0781 - j \cdot 0{,}0316.$$

Оба корня комплексные сопряженные с отрицательной вещественной частью. Следовательно, переходный процесс будет колебательным затухающим.

Пример 2. Построить амплитудно-фазовые характеристики объекта, ПИ-регулятора и разомкнутой системы и исследовать систему на устойчивость по данным примера 1.

Передаточная функция объекта

$$W(p)_o = \frac{0{,}0142}{p + 0{,}0142}.$$

Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p)_p = \frac{1 + 60p}{12p}.$$

Аналитическое выражение амплитудно-фазовой характеристики объекта

$$W(j\omega)_o = \frac{0{,}0142}{j\omega + 0{,}0142}.$$

После избавления от мнимости в знаменателе получим

$$W(j\omega)_o = \frac{0{,}0002 - j\omega \cdot 0{,}0142}{0{,}0002 + \omega^2}.$$

Это есть комплексное число вида $\alpha + j\beta$, в котором

$$\alpha = \frac{0{,}0002}{0{,}0002 + \omega^2}$$

и

$$\beta = -\frac{\omega \cdot 0{,}0142}{0{,}0002 + \omega^2}.$$

Далее находим модуль вектора комплексной переменной на комплексной плоскости

$$A(\omega)_o = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \sqrt{\frac{0{,}00000004 + 0{,}0002\,\omega^2}{0{,}00000004 + 0{,}0004\,\omega^2 + \omega^4}}$$

и аргумент вектора (фазовый угол)

$$\theta_o = \operatorname{arctg}\frac{\beta}{\alpha} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{\omega \cdot 0{,}0142}{0{,}0002}\right) = \operatorname{arctg}(-70{,}5\,\omega),$$

$$\operatorname{tg}\theta_o = -70{,}5\,\omega.$$

Придавая разные значения для ω, составляем табл. 7.1 значений $A(\omega)_o$, $\operatorname{tg}\theta_o$ и θ_o.

Таблица 7.1

Значения $A(\omega)_0$, $\operatorname{tg}\theta_0$ и θ_0 для построения амплитудно-фазовой характеристики объекта

№ п/п	ω	$A(\omega)_0$	$\operatorname{tg}\theta_0$	θ_0, *град*
1	0	1	0	0
2	0,001	0,985	−0,0705	−4,3
3	0,005	0,945	−0,3525	−19,4
4	0,01	0,818	−0,705	−35,2
5	0,02	0,579	−1,410	−54,7
6	0,03	0,425	−2,15	−65,1
7	0,05	0,272	−3,525	−74,2
8	0,10	0,140	−7,05	−81,9
9	0,20	0,0705	−14,1	−85,9
10	0,40	0,035	−28,2	−88,0
11	0,60	0,024	−42,3	−88,6
12	0,80	0,018	−56,4	−89,0
13	1,00	0,014	−70,5	−89,2
14	10,00	0,010	−705,0	−89,9
15	20,00	0,002	−1410,0	−89,95
16	∞	0	−∞	−90,0

По полученным данным строим амплитудно-фазовую характеристику объекта (рис. 7. 67). Как видим, она имеет форму полуокружности, описанной под положительным направлением вещественной оси на расстоянии k от начала координат. Это соответствует коэффициенту усиления объекта $k = 1$. Полученная характеристика идентична характеристике звена первого порядка.

Аналитическое выражение для амплитудно-фазовой характеристики ПИ-регулятора

$$W(j\omega)_p = -\frac{1+60j\omega}{12j\omega}.$$

Освобождаясь от мнимости в знаменателе, после преобразования получим

$$W(j\omega)_p = \frac{720\omega - 12j}{144\omega}.$$

Это есть комплексное число вида $\alpha + j\beta$, у которого $\alpha = 5$ и $\beta = -\frac{1}{0{,}083\omega}$.

Рис. 7. 67. Амплитудно-фазовая характеристика объекта первого порядка с самовыравниванием.

Модуль вектора комплексной переменной на комплексной плоскости

$$A(\omega)_p = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \sqrt{25 + \frac{1}{0{,}0069\,\omega^2}}.$$

Аргумент вектора (фазовый угол)

$$\theta_p = \operatorname{arctg}\frac{\beta}{\alpha} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{1}{0{,}415\,\omega}\right) \text{ и } \operatorname{tg}\theta_p = -\frac{1}{0{,}415\,\omega}.$$

Придавая разные значения для ω, составляем табл. 7.2 значений $A(\omega)_p$, $\operatorname{tg}\theta_p$ и θ_p.

Таблица 7.2

Значения $A(\omega)_p$, $\operatorname{tg}\theta_p$ и θ_p для построения амплитудно-фазовой характеристики регулятора

№ п/п	ω	$A(\omega)_p$	$\operatorname{tg}\theta_p$	θ_p, *град*
1	0	∞	$-\infty$	−90,0
2	0,001	12 050	−2400	−89,95
3	0,005	2 410	−450	−89,90
4	0,01	1 205	−241	−89,80
5	0,02	601	−120	−89,5
6	0,03	402	−80,5	−89,3
7	0,05	241	−48,2	−88,8
8	0,10	121	−24,1	−87,6
9	0,2	60,5	−12,2	−85,3
10	0,4	30,6	−6,3	−81,0
11	0,6	20,7	−4,0	−80,0
12	0,8	15,8	−3,2	−72,6
13	1,0	13,1	−2,41	−67,5
14	10,0	5,15	−0,241	−13,6
15	20,0	5,04	−0,112	−6,9
16	∞	5,0	0	0

По полученным данным строим график (рис. 7. 68). Как видим, график амплитудно-фазовой характеристики ПИ-регулятора представляет собой прямую линию, параллельную отрицательному направлению мнимой оси, отстоящей от нее на расстоянии $1/\delta$. При уменьшении частоты увеличивается отставание по фазе выходных колебаний от входных, которое при $\omega = 0$ стремится к $-\frac{\pi}{2}$.

Имея графики амплитудно-фазовых характеристик для объекта и регулятора, строим амплитудно-фазовую характеристику рассматриваемой нами разомкнутой системы.

Значения модулей системы $A(\omega)_c$ получаем путем перемножения модулей объекта и регулятора:

$$A(\omega)_c = A(\omega)\;A(\omega)_p.$$

Значения фазовых углов θ_c для системы получаем сложением фазовых углов объекта и регулятора:

$$\theta_c = \theta_o + \theta_p.$$

Полученные данные сводим в табл. 7. 3.

Вид кривой, построенной по данным табл. 7. 3, приведен на рис. 7. 69. Как видно, амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы, состоящей из объекта первого порядка с самовыравниванием и ПИ-регулятора, не охватывает точки $-1, j0$

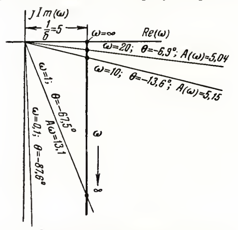


Рис. 7. 68. Амплитудно-фазовая характеристика ПИ-регулятора.

Рис. 7. 69. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы регулирования, состоящей из объекта первого порядка с самовыравниванием и ПИ-регулятора.

на отрицательном направлении вещественной оси. Следовательно, согласно амплитудно-фазовому критерию устойчивости данная система будет устойчива и в замкнутом состоянии, что и подтверждается изложенным выше.

П р и м е р 3. Исследовать на устойчивость по диаграмме Вышнеградского систему, состоящую из объекта второго порядка и ПИ-регулятора [см. уравнение 7. 125)].

Входящие в это уравнение величины имеют значения:

$$\delta = 0{,}4; \quad T_i = 100 \text{ сек}; \quad T = 30 \text{ сек}; \quad k_o = 5.$$

Коэффициенты уравнения

$$a_0 = \delta\, T_i T^2 = 0{,}4 \cdot 100 \cdot 30^2 = 36000,$$

$$a_1 = \delta\, T_i 2T = 0{,}4 \cdot 100 \cdot 2 \cdot 30 = 2400,$$

$$a_2 = (k_o + \delta)\, T_i = (5 + 0{,}4)\ 100 = 540; \quad a_3 = k_o = 5.$$

Таблица 7.3

Значения $A(\omega)_c$ и θ_c для построения амплитудно-фазовой характеристики системы

№ п/п	ω	$A(\omega)_0$	$A(\omega)_p$	$A(\omega)_c$	θ_0, *град*	θ_p, *град*	θ_c, *град*
1	0	1			0	—90,0	—90,0
2	0,001	0.985	12 050	11 900	—4,3	—89 95	—94,25
3	0,005	0,945	2 410	2 270	—19,4	—89,9	—109,3
4	0,01	0,818	1 205	885	—35,2	—89,8	—125,0
5	0,02	0,579	601	348	—54,7	—89,5	—144,2
6	0,03	0,425	402	171	—65,1	—89,3	—154,4
7	0.05	0,272	241	65,5	—74,2	—88,8	—163,0
8	0.10	0,140	121	16,9	—81,9	—87,6	—169,0
9	0.20	0,070	60,5	4,2	—85,9	—85,3	—171,2
10	0.4	0,035	30.6	1,07	—88,0	—81,0	—169,0
11	0,6	0,024	20,7	0,5	—88,6	—80,0	—168,6
12	0.8	0,018	15,8	0,28	—89,0	—72,6	—161,6
13	1,0	0,014	13,0	0,181	—89,2	—67,5	—156,4
14	10	0,010	5,15	0,052	—89,9	—13,6	—103,5
15	20	0,0025	5,04	0,013	—89,95	—6,9	—96,8
16	∞	0	5,0	0	—90,0	0	—90,0

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$36000\,p^3 + 2400\,p^2 + 540\,p + 5 = 0.$$

Освобождаясь от коэффициента при p^3, приводим уравнение к виду уравнения (7.134):

$$p^3 + 0,0667\,p^2 + 0,015\,p + 0,000139 = 0.$$

Определяем обобщающие коэффициенты:

$$X = \frac{0,0667}{\sqrt[3]{0,000139}} = 1,28$$

и

$$Y = \frac{0,015}{\sqrt[3]{0,000139^2}} = 5,6.$$

Произведение

$$XY = 1,28 \cdot 5,6 = 7,16 > 1.$$

Следовательно, система устойчива. Точка с найденными координатами X и Y на диаграмме (см. рис. 7. 57) лежит в области II, которая характеризует переходный процесс как колебательный затухающий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклушин П. А., Киселев И. К., Кубасова Л. И. Автоматизация теплоэнергетических установок. Госэнергоиздат, 1960.
2. Ордынцев В. М., Шендлер Ю. И. Автоматическое регулирование технологических процессов. Машгиз, 1960.
3. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. Госэнергоиздат, 1960.
4. Оппельт В. Основы техники автоматического регулирования. Госэнергоиздат, 1960.
5. Лоссиевский В. Л. Основы автоматического регулирования технологических процессов. Оборонгиз, 1949.
6. Лернер Л. Я. Введение в теорию автоматического регулирования. Машгиз, 1958.
7. Фатеев А. В. Основы линейной теории автоматического регулирования. Госэнергоиздат, 1954.
8. Дудников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. Госэнергоиздат, 1956.
9. Олейников В. А., Зотов Н. С. Автоматическое регулирование технологических процессов в нефтяной и нефтехимической промышленности. Гостоптехиздат, 1962.
10. Ротач В. Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. Госэнергоиздат, 1961.
11. Автоматическая оптимизация управляемых систем. Сборник под редакцией члена корреспондента АН СССР Б. Н. Петрова. ИЛ, 1960.
12. Островский Ю. И. Пневматический экстремум-регулятор. Автоматика и телемеханика, т. XXIII, № 11, 1957.
13. Мееров М. В., Дианов В. Г. Теория автоматического регулирования и авторегуляторы. Гостоптехиздат. 1963.

ГЛАВА 8

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

§ 1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Кроме деления регуляторов на типы П, И, ПИ, ПД и ПИД и по способу действия — на прямого и непрямого действия, различают регуляторы прерывного и непрерывного действия. Существуют еще программные регуляторы.

Регуляторы прерывного действия — такие, у которых при непрерывном изменении регулируемой величины регулирующий орган перемещается прерывно через определенные промежутки времени. К числу прерывных относятся некоторые виды электрических регуляторов, у которых регулирующий орган имеет привод от электродвигателя, включаемого регулятором через определенные интервалы. В процессах нефтепереработки регуляторы прерывного действия, например двухпозиционные, применяют редко.

Пневматические П-, ПИ- и ПИД-регуляторы являются регуляторами непрерывного действия. У них при изменениях регулируемой величины регулирующий орган перемещается непрерывно.

Программные регуляторы — такие, у которых задание изменяется особым устройством по заданной программе. Например, программный регулятор может поддерживать температуру, повышая и понижая ее в определенное время. Регулирующее устройство программных регуляторов почти ничем не отличается от обычных (не программных) регуляторов.

По виду вспомогательной энергии, применяемой для привода регулирующего органа, регуляторы непрямого действия подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические. В процессах нефтепереработки в основном применяют пневматические регуляторы как взрывобезопасные. В связи с этим в данной книге описываются только основные виды пневматических регуляторов. Для ознакомления с электрическими и гидравлическими регуляторами необходимо обратиться к другим источникам.

Кроме указанного выше, регуляторы различают еще по виду регулируемой величины: регуляторы температуры, давления, расхода уровня и т. п. Промышленные регуляторы различных параметров, как правило, имеют одинаковые регулирующие устройства и отличаются друг от друга лишь видом и устройством измерительной части.

Например, наиболее распространенный пневматический ПИ-регулятор типа 0,4, выпускаемый отечественной промышленностью, используется для регулирования почти всех видов регулируемых параметров процессов нефтепереработки. Схема и действие регулятора типа 04 были описаны в § 6 главы 7 (см. рис. 7. 48).

Описанные в главе 5 пневматические устройства для дистанционной передачи показаний уровнемеров широко применяются и для регулирования уровня, так как они по своему устройству (см. рис. 5. 11 и 5. 13) и действию являются П-регуляторами.

§ 2. РЕГУЛЯТОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА АУС

В последние годы получают все большее распространение пневматические регуляторы АУС (агрегатно-унифицированной системы). В эту систему входят не только регуляторы, но и другие блоки, выполняющие различные функции; эти блоки (блок предварения, реле соотношения, блок суммирования, блок соотношения и др.) также могут быть включены в систему регулирования.

Основным в системе АУС является регулирующий блок, представляющий собой ПИ-регулятор.

Регулятор собран из стальных колец разной высоты наружным диаметром 70 *мм*, стянутых болтами, и общей высотой 150—200 *мм*. Кольца образуют ряд камер, разделенных резиновыми мембранами и металлическими перегородками (рис. 8. 1). Регулятор включает блоки усилителя, пропорциональности и интегрирующий. Кроме того, он имеет дополнительное реле отключения, не имеющее какого-либо принципиального отношения к регулирующему устройству.

Для питания регулятора требуется сухой очищенный от пыли и других примесей сжатый воздух или инертный газ при постоянном давлении 1,4 $кГ/см^2$. Для очистки воздуха и поддержания постоянного давления перед регулятором на линии питания сжатым воздухом устанавливают небольшой фильтр и редуктор давления (на рисунке не показаны). Регулятор не имеет шкалы, и для наблюдения за изменением регулируемой величины требуется вторичный прибор. Регулируемая величина подводится к регулятору в виде давления сжатого воздуха от соответствующего датчика.

Для работы регулятора необходим еще один редуктор давления воздуха — задатчик — для подачи давления задания, изменяемого вручную в пределах от 0,2 до 1 $кГ/см^2$.

В качестве примера на рис. 8. 2 приведена схема применения регулятора АУС в системе регулирования давления в газосепараторе. Вторичный прибор, кроме регистрации регулируемой величины, поступающей от датчика, измеряет давление воздуха после регулятора (на клапан), выдает сигнал на реле отключения регуля-

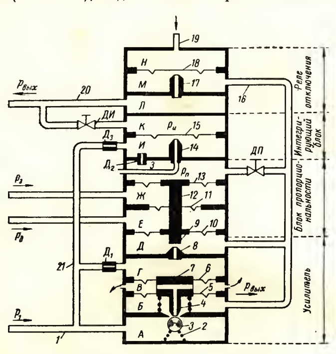


Рис. 8. 1. ПИ-регулятор АУС.

1 — линия входа воздуха питания; *2* — пружина; *3* — шариковый клапан; *4* — полый шток; *5*, *6*, *10*, *11*, *13*, *15* и *18* — мембраны; *7* — шайба; *8*, *14* и *17* — сопла; *9* — заслонка; *16* — трубка выходящего воздуха; *12* — стержень; *19* — штуцер для входа воздуха в реле отключения; *20* — линия выхода воздуха; *21* — трубка питания дросселей $Д_1$ и $Д_3$; *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*, *Ж*, *З*, *И*, *К*, *Л*, *М*, *Н* — камеры; $Д_1$, $Д_2$, и $Д_3$ — постоянные дроссели; *ДП* — дроссель настройки неравномерности; *ДИ* — дроссель настройки времени изодрома; p_1 — давление воздуха питания; $p_з$ — давление задания; $p_д$ — давление от датчика; $p_{вых}$ — давление выходное; $p_п$ — давление в камере З; $p_и$ — давление в камере И.

тора и позволяет перейти на ручное управление регулирующим клапаном, выдает давление задания регулятору. Пневматический сигнал на отключение регулятора и переход на ручное управление выдается краном переключения, встроенным в корпус вторичного прибора. Поворотом рукоятки крана *5* воздух от линии питания подается на реле отключения регулятора, а к линии на клапан подключается воздух от задатчика. При ручном управлении давление на клапан изменяется вручную рукояткой редуктора задатчика.

Существуют разновидности регуляторов АУС, у которых реле отключения отсутствует. В некоторых моделях задатчик расположен не в корпусе вторичного прибора, а непосредственно в верхней части регулятора.

Как видно из схемы, регулятор не связан механически с вторичным прибором, он просто подключен к той же линии выходного давления датчика, к которой подключен и вторичный прибор. Такое включение регулятора возможно только при условии применения пневматического датчика.

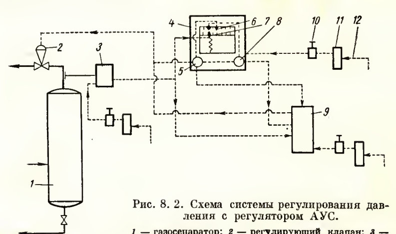


Рис. 8. 2. Схема системы регулирования давления с регулятором АУС.

1 — газосепаратор; 2 — регулирующий клапан; 3 — датчик давления; 4 — вторичный прибор; 5 — рукоятка устройства для включения реле отключения и перевода системы на ручное управление; 6 — указатель давления на клапан; 7 — указатель и регистратор регулируемой величины; 8 — рукоятка задатчика; 9 — регулятор АУС; 10 — редуктор давления; 11 — фильтр воздуха; 12 — линия питания.

Раздельное действие регулятора и вторичного прибора создает ряд преимуществ по сравнению с обычными регуляторами, у которых регулирующее устройство встроено в измерительный прибор. Благодаря отсутствию механических сочленений (тяг и рычагов) между измерительной частью вторичного прибора и регулятором полностью исключены погрешности, связанные с люфтами и силами трения подвижной системы. Раздельная установка позволяет удалить регулятор от вторичного прибора, например приблизить его к клапану или установить в удобном для обслуживания месте. И, наконец, регулятор может быть использован для регулирования любого параметра, измеряемого пневмодатчиком.

Вторичный прибор и регулятор могут быть установлены на расстоянии до 150 *м* от датчика.

Регулятор АУС действует так (см. рис. 8. 1). Воздух из линии питания *1* при давлении 1,4 *кГ/см*^{2} поступает в камеру *А*, выходное отверстие которой перекрывает шариковый клапан *3* при помощи

пружины *2*. К шарику *3* прилегает полый шток *4*, являющийся продолжением шайбы *7*, скрепленной с двумя одинаковыми резиновыми мембранами *5* и *6*. Камера *В* между этими мембранами сообщена с атмосферой через отверстия в корпусе.

Мембраны *5* и *6* скреплены между собой шайбой *7* и могут перемещаться (прогибаться) вверх или вниз под действием разности давления в камерах *Г* и *Б*. Если сила, действующая на мембраны со стороны камеры *Г*, больше, чем в камере *Б*, то мембраны движутся вниз, если меньше, то вверх. При движении мембран вниз полый шток *4* отводит шарик тоже вниз и воздух из камеры *А* проникает в камеру *Б*. При движении мембран *5* и *6* вверх шарик прикрывает отверстие, доступ воздуха из камеры *А* в камеру *Б* уменьшается и может прекратиться совсем, при этом камера *Б* через полый шток *4* и камеру *В* сообщается с атмосферой.

Благодаря наличию пружины под мембраной *5* давление в камере *Г* всегда больше давления в камере *Б* на постоянную величину, пропорциональную упругости пружины, примерно на 0,2 $кГ/см^2$. Так как камеры *Д* и *Б* сообщены между собой, то очевидно, что перепад давления в 0,2 $кГ/см^2$ поддерживается и на сопле *8*. При неизменном давлении питания (в камере *Г*) перепад давления на сопле *8* во время работы регулятора остается все время постоянным. Сопло *8*, работающее при постоянном перепаде давления, в отличие от сопел, работающих при переменном перепаде (со сбросом в атмосферу), имеет бо́льшую чувствительность к перемещениям заслонки и более линейную характеристику.

Блок усилителя является усилителем мощности, но не величины давления. Давление в камере *Г* всегда отличается от давления в камерах *Д* и *Б* лишь на постоянную величину 0,2 $кГ/см^2$. Но количество воздуха (мощность потока), протекающего через шариковый клапан *3* в линию выхода, во много раз превышает поток воздуха через сопло *8*.

Из линии питания *1* часть воздуха подается по трубке *21* к постоянным дросселям $Д_1$ и $Д_3$. Через дроссель $Д_1$ воздух течет в камеру *Г* и из нее через сопло *8* — в камеру *Д* и далее в трубку *16*. Трубка *16* для выходящего воздуха через регулируемый дроссель *ДП* соединяется с камерой *З*. Верхний конец трубки *16* подключен к камере *М*, сообщенной через сопло *17* с линией *20*, по которой выходное давление $p_{вых}$ воздуха из регулятора передается на мембранный привод исполнительного механизма (на рис. 8. 1 не показан). Камера *М* отделена от камеры *Н* резиновой мембраной *18*. В камеру *Н* по трубке *19* может подаваться сжатый воздух от вторичного прибора (на рис. 8. 1 не показан). Из линии *20* воздух через дроссель *ДИ* поступает в камеру *К*, отделенную от камеры *И* резиновой мембраной *15*. Воздух из линии питания через дроссель $Д_3$ течет в камеру *И*. Последняя сообщена через дроссель $Д_2$ с камерой *З* и через сопло *14* — с атмосферой.

Между камерами *З* и *Д* расположена сборка из трех мембран *10*, *11* и *13*, образующих камеры *Ж* и *Е*. В камеру *Ж* подается воздух от задатчика, давление которого при работе регулятора не изменяется. Давление в камере *Ж* изменяют лишь при изменении задания регулятора. В камеру *Е* поступает воздух от датчика, давление которого является регулируемой величиной. Площади мембран *10* и *13* одинаковы. Площадь средней мембраны *11* меньше, чем у каждой из мембран *10* и *13*. Все три мембраны жестко соединены между собой стержнем *12* и перемещаются вверх или вниз все вместе. Нижняя часть стержня *12*, выступающая в камеру *Д*, образует заслонку *9* для сопла *8*.

При равных давлениях в камерах *Д* и *З* ($p_{вых} = p_{п}$) сборка из трех мембран *10*, *11* и *13* может перемещаться только при изменениях давления в камерах *Е* или *Ж*. При постоянном давлении задания мембраны будут перемещаться вниз, если давление в камере *Е* становится больше, т. е. если $p_{д} > p_{з}$, и вверх, если $p_{д} < p_{з}$.

Когда $p_{д} = p_{з}$ и $p_{вых} = p_{п}$, мембраны находятся в покое.

Предположим, что регулятор включен в систему регулирования, как показано на рис. 8. 2, и его мембраны находятся в покое. Такое состояние соответствует равенству регулируемой величины ее заданному значению.

Допустим, что регулируемое давление увеличилось на конечную величину, например от уменьшения потребления газа, и увеличилось выходное давление датчика $p_{д}$ (см. рис. 8. 1). От этого равновесие нарушится, сила, направленная вниз, увеличится и мембраны начнут перемещаться вниз, заслонка *9* приблизится к соплу *8*. Как только это произойдет, повысится давление в камере *Г*, мембраны *5* и *6* прогнутся и шарик *3* опустится. Приток воздуха из камеры *А* в камеру *Б* увеличится. От этого повысится выходное давление $p_{вых}$, которое, действуя в камере *Д* на мембрану *10*, приостановит перемещение мембраны вниз.

Увеличившееся выходное давление $p_{вых}$ воздействует на регулирующий орган и заставляет его приоткрыться (см. рис. 8. 2), чтобы регулируемое давление понизилось. Допустим, что оно понизилось до заданного и давление $p_{д}$ (рис. 8. 1) снова стало равным $p_{з}$. Чтобы не было дальнейшего повышения выходного давления $p_{вых}$, необходимо, чтобы и давление в камерах *Д* и *З* снова стало одинаковым, т. е. $p_{вых} = p_{п}$. Действительно, это происходит за счет увеличения давления $p_{п}$ в камере *З*. Из-за наличия дросселя $Д_2$ давление в камере *З* может отличаться некоторое время от давления в камере *И*. Давление же в камере *И* всегда равно давлению в камере *К*, так как они отделены друг от друга мембраной *15*, имеющей равные площади каждой из сторон. Лишь при установившемся $p_{вых}$ давление в камерах *З* и *И* выравнивается через дроссель $Д_2$ и делается равным давлению в камере *К*. Избыток воздуха из камеры *И* сбрасывается в атмосферу через сопло *14*.

Давление $p_и$ в камере *К* может отличаться от $p_{вых}$ из-за дросселя *ДИ*, но лишь тогда, когда $p_{вых}$ изменяется. При неизменном значении $p_{вых}$ через некоторое время $p_и$ становится равным $p_{вых}$.

Так создается новое состояние равновесия. Заслонка *9* стала несколько ближе к соплу *8*, выходное давление немного повысилось, а регулируемая величина вернулась после отклонения опять к заданному значению.

При уменьшении давления $p_д$ в камере *Е* заслонка *9* под действием увеличившейся силы, направленной вверх, отойдет от сопла *8*, выходное давление понизится, понизятся и давления в камерах *К*, *И* и *З*. Когда давление $p_д$ снова станет равным давлению задания, наступит новое состояние равновесия при ином выходном давлении.

Давление в камере *Д* выполняет работу отрицательной, а в камере *З* положительной обратной связи. Последняя служит для того, чтобы можно было изменять величину отрицательной обратной связи, определяющей собой неравномерность регулятора, или, как принято называть эту величину в промышленных регуляторах, диапазон дросселирования (или пропорциональности).

Регулировка (настройка) неравномерности достигается открытием или прикрытием дросселя *ДП*. Если открытие дросселя увеличить, то действие положительной обратной связи увеличивается и в результате отрицательная обратная связь уменьшается, вместе с ней уменьшается и неравномерность. При прикрытии дросселя неравномерность увеличивается.

Дроссель *ДИ* и камера *К* создают интегрирующее действие регулятора. Для пояснения этого допустим, что регулируемая величина $p_д$ несколько увеличилась и некоторое время не возвращается к заданному значению даже после увеличения выходного давления, вызванного перемещением заслонки *9* вниз в момент изменения $p_д$.

Если нет интегрирующего действия (при закрытом дросселе *ДИ*), давление в камере *К* после отклонения $p_д$ от заданного значения не будет изменяться. Давление положительной обратной связи также не изменится. Давление $p_{вых}$ несколько увеличится, но при этом регулируемая величина не возвратится к заданному значению ($p_д$ будет оставаться больше $p_в$). Благодаря интегрирующему действию регулируемая величина будет возвращена к заданному значению даже после прекращения ее изменения. Это достигается тем, что в нашем случае после увеличения $p_д$ и повышения $p_{вых}$ давление $p_и$ в камере *К* не остается постоянным (так как дроссель *ДИ* открыт), а начинает повышаться, но с некоторым запаздыванием по времени за счет сопротивления этого дросселя. Это влечет за собой постепенное повышение давления $p_п$ положительной обратной связи до значения $p_{вых}$. В результате сборка трех мембран, а вместе с ними и заслонки *9* опять начнут двигаться вниз из-за разности давлений в камерах *Е* и *Ж* ($p_д > p_з$). От этого выходное давление

будет повышаться. Если регулируемая величина не возвратится к заданному значению, то повышение выходного давления будет продолжаться до тех пор, пока оно не достигнет верхнего предельного значения (1 *кГ/см*²). Если же регулируемая величина примет заданное значение, то давления в камерах *Е* и *Ж* станут равными и движение заслонки вниз прекратится.

При уменьшении давления $p_д$ интегрирующим действием заслонка *9* будет отводиться от сопла *8* и $p_{вых}$ будет понижаться все то время, пока регулируемая величина не будет возвращена к заданному значению.

Интегрирующее действие можно изменять настройкой дросселя *ДИ*, причем оно уменьшается с прикрытием дросселя и наоборот. Оценивают интегрирующее действие этого регулятора также по величине времени изодрома T_i.

Отличительной чертой регулятора АУС является то, что у него мембраны перемещаются от разности действующих на них сил, причем при возникновении этой разности тотчас же возрастают силы противоположного направления, которые ее устраняют. Такое действие называется компенсацией сил, поэтому подобные регуляторы называют компенсационными. Результирующие перемещения подвижных деталей очень незначительны. Например, сборка из трех мембран перемещается лишь в пределах рабочего хода заслонки *9*, который составляет сотые доли миллиметра. Это обстоятельство значительно повышает срок службы регулятора за счет уменьшения износа подвижных частей.

Регулятор АУС имеет значительно бо́льшую чувствительность к изменениям регулируемой величины, чем регуляторы пневматического действия, описанные выше. Это объясняется достаточно большими площадями его мембран, которые начинают перемещаться уже при очень малых разностях давлений.

Промышленные регуляторы АУС выпускаются с неравномерностью, которую можно настраивать в пределах от 10 до 250%, и с временем изодрома, имеющим настройку от 3 *сек* до 100 *мин*.

На рис. 8. 3. приведена схема блока предварения АУС, который может быть подключен к выходу регулятора или к его входу на линии давления от датчика. В обоих случаях блоком предварения достигается придание ПИ-регулятору свойств ПИД-регулятора. Блок предварения можно подключать к выходу обычных регуляторов типа П и ПИ, что дает возможность получить результирующие характеристики ПД- и ПИД-регуляторов.

Блок состоит из усилителя, устроенного так же, как и усилитель у описанного выше ПИ-регулятора АУС (рис. 8. 1), и сборки трех мембран. Мембраны *4* и *6* одинаковы, площадь каждой из них больше площади средней мембраны *5*. Мембраны находятся в покое, если давления в камерах *Д*, *Е*, *Ж* и *З* равны, при этом давление на выходе $p_{вых}$ равно давлению на входе $p_д$ (в камере *Е*). Если

это давление не изменяется, то блок работает как усилитель мощности.

Блок предварения имеет отрицательную в камере *Д* и положительную в камерах *З* и *Ж* обратные связи. Когда давление p_1 не изменяется, действие силы со стороны мембраны *4* компенсируется давлением $p_{вых}$ в камере *Ж*. В это время сила давления в камере *Е*, направленная вниз, уравновешивается разностью сил давлений в камерах *Д* и *Ж*, и мембраны находятся в покое.

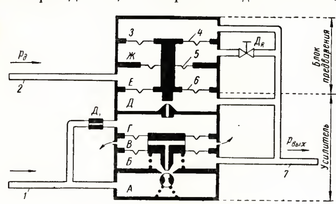


Рис. 8. 3. Блок предварения АУС.

1 — линия питания сжатым воздухом; *2* — выходное давление $p_д$ от регулятора или датчика; *3* — стержень; *4*, *5* и *6* — мембраны; *7* — линия выходного давления $p_{вых}$ блока; $Д_1$ — постоянный дроссель; $Д_R$ — дроссель настройки времени предварения; *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*, *Ж* и *З* — камеры.

Допустим, что блок работает и на выходе установилось какое-либо неизменное давление между 0 и 1 *кГ/см*². Пусть далее давление $p_д$ начало изменяться, например в сторону повышения. В момент начала изменения $p_д$ вследствие возрастания давления в камере *Е* равновесие нарушается и мембраны начинают двигаться вниз, заслонка прикрывает сопло усилителя и выходное давление повышается. Одновременно повышается давление в камере *З*. Но в камере *Ж* давление повышается до $p_{вых}$ не сразу, а с некоторым запаздыванием в зависимости от степени открытия дросселя $Д_R$. Вследствие этого в первый момент в большей степени действует положительная обратная связь в камере *З*, которая ускоряет движение заслонки вниз, что создает скачок выходного давления. Во время дальнейшего изменения $p_д$ давление в камере *Ж* не становится равным $p_{вых}$, поэтому продолжает действовать положительная обратная связь, что и приводит к опережению выходным давлением давления $p_д$ (см. рис. 7. 49). При увеличении эффекта предварения величина отклонения $1/\delta$ и время предварения T_R становятся боль-

ше, а при уменьшении — меньше. Зависимость величины выходного давления $p_{\text{вых}}$ от входного для блока предварения выражается (с некоторым упрощением) уравнением

$$p_{\text{вых}} = p_{\text{д}} + T_{R} \frac{dp_{\text{д}}}{dt}. \qquad (8.1)$$

Как видно, выходное давление равно сумме из входного и дополнительного приращения давления, пропорционального скорости изменения этого же входного давления.

При синусоидальном изменении $p_{\text{д}}$ давление на выходе из блока предварения также изменяется синусоидально, но опережает по фазе входные колебания. Время предварения T_R описанного блока можно изменять в пределах от 0,05 до 10 *мин* регулировкой дросселя $Д_R$. С прикрытием дросселя время предварения T_R увеличивается.

Добавление блока предварения улучшает качество работы ПИ-регулятора. Блоки предварения обычно применяют в системах регулирования, включающих объекты с большим запаздыванием.

Важным прибором АУС является блок суммирования. Применяется он тогда, когда требуется ввести коррекцию к одной величине по значению другой. В этом случае два пневматических сигнала (выходные давления датчиков или регуляторов) суммируются и лишь результирующий общий сигнал воздействует на регулирующий орган системы регулирования. Схема блока суммирования приведена на рис. 8. 4.

В отличие от регулятора и блока предварения АУС в блоке суммирования применен усилитель мощности, в котором изменения давления питающего воздуха не оказывают влияния на давление выхода. В регуляторе и блоке предварения выходное давление хотя и в небольшой степени, но все же изменяется при колебаниях давления питания, которые могут быть, несмотря на наличие редуктора, на линии питания перед приборами. Но поскольку они не являются измерительными блоками, эти колебания допустимы. Они практически не оказывают влияния на качество работы, поскольку блоки входят в замкнутый контур системы регулирования. Блок же суммирования выполняет арифметические действия, и его результат должен зависеть исключительно от величин, участвующих в этих действиях, но не от колебаний давления питания.

Воздух к соплу *4* и в камеру *Г* поступает через постоянный дроссель *2*, на котором поддерживается постоянный перепад, не зависящий от изменения давления питания.

Объясняется это наличием в камере *Ж* пружины. Давление в камере *Е* поддерживается всегда выше давления в камере *Ж* на постоянную величину, пропорциональную упругости пружины. Например, при увеличении давления в камере *Е* мембрана *3* прогнется вверх, шариковый клапан *1* уменьшит доступ воздуха и давление

в камере E понизится. При понижении давления питания шариковый клапан приоткроется и давление снова повысится. Как бы ни изменялось давление в камере $Ж$ (от 0,2 до 1 $кГ/см^2$), перепад давления в камерах $Ж$ и E, а следовательно, и на дросселе *2* всегда остается постоянным (около 0,2 $кГ/см^2$).

Давление за дросселем *2* и выходное давление $p_{вых}$ зависят только от давления в камере $Ж$, определяемого положением заслонки *5* относительно сопла *4*.

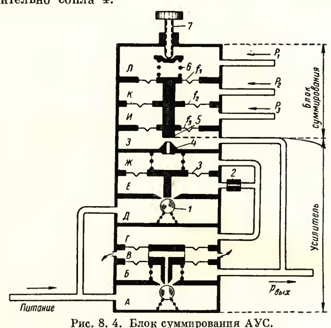


Рис. 8. 4. Блок суммирования АУС.

1 — шариковый клапан; *2* — постоянный дроссель; *3*, f_1, f_2, f_3 — мембраны; *4* — сопло; *5* — заслонка; *6* — пружина; *7* — винт настройки; *А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З, И, К* и *Л* — камеры; p_1, p_2, p_3 и $p_{вых}$ — давление.

Суммируемыми величинами являются давления p_1, p_2 и p_3 от трех датчиков, регуляторов или других устройств. Мембраны f_1, f_2 и f_3 образуют общую сборку и могут перемещаться вверх или вниз только все вместе. Площади мембран f_1 и f_3 равны, каждая из них составляет 0,5 f_2.

Для пояснения действия блока составим уравнение равновесия сил сборки мембран и выразим $p_{вых}$ через p_1, p_2 и p_3.

Уравнение равновесия сил

$$p_1 f_1 + p_2 f_2 + p_3 f_3 + C_1 = p_{вых} f_3 + p_3 f_2 + p_2 f_1, \qquad (8.2)$$

где C_1 — сила упругости пружины *6*, которую можно изменить натяжением винта *7*.

ния. В корпус вторичного прибора, работающего с регулятором АУС, встроены переключения регулирующего клапана с автоматического управления на ручное и задатчик пневматического действия. Задатчик является регулятором давления прямого действия.

§ 3. РЕГУЛЯТОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Использование энергии регулируемой среды для приведения в действие регулирующего органа весьма целесообразно и экономически выгодно, поэтому создаются все более совершенные виды регуляторов прямого действия.

В особенности благоприятной областью для применения регуляторов прямого действия является область регулирования давления газа, чему способствует бурное развитие газовой промышленности. В меньшей степени регуляторы прямого действия применяются и для ругулирования давления жидких нефтепродуктов, температуры, уровня и расхода.

В зависимости от вида нагрузки различают следующие регуляторы давления прямого действия:

1) грузовые;
2) пружинные;
3) с нагрузкой постоянным давлением;
4) с нагрузкой переменным давлением.

В последних для изменения давления нагрузки применяют вспомогательные устройства, называемые пилотными. Этот вид регуляторов прямого действия получил название пилотных.

Простейший И-регулятор с грузовой нагрузкой был описан выше (см. рис. 7. 45). Существует большое число разновидностей этих регуляторов, но область применения всех их ограничена низкими и средними (до 6—10 *кГ/см*²) давлениями из-за недостаточной прочности мембраны, подвергающейся одностороннему давлению. В регуляторах прямого действия применяют обычно мембраны из прорезиненной ткани, которая не выдерживает высоких односторонних давлений. Однако применение мембраны из новых синтетических материалов (капрона, нейлона и др.) может расширить область их применения в сторону более высоких давлений.

П-регулятор прямого действия с пружинной нагрузкой также был описан (см. рис. 7. 38). Число разновидностей этих регуляторов чрезвычайно велико.

Редукторы, применяемые для поддержания давления сжатого воздуха, поступающего на питание пневматических регуляторов непрямого действия, являются пружинными регуляторами прямого действия (рис. 8. 6). Производительность их по воздуху при нормальных условиях составляет около 1,5 *м*³/*ч*. Редукторы основаны на сравнении сил, действующих на мембрану со стороны выходного давления и нагрузочной пружины. Разность этих сил перемещает клапан *2*,

которым регулируется приток воздуха на сторону выхода. Редукторы настраивают на заданное выходное давление изменением натяжения нагрузочной пружины *4*. Назначение их состоит в поддержании выходного давления постоянным при возможных изменениях входного давления.

Редукторы бывают без сброса и со сбросом воздуха. У первых (рис. 8. 6, *а*) при герметичной системе на выходе и отсутствии расхода выходное давление нельзя понизить и сделать меньше выходного давления в данный момент. Как видно из рисунка, при ослаблении натяжения пружины винтом настройки *5* клапан *2* закроет проход-

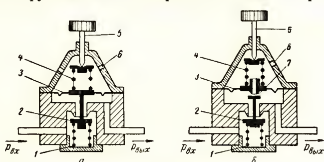


Рис. 8. 6. Редукторы давления воздуха пневматических регуляторов.

а — без сброса воздуха; *б* — со сбросом воздуха; *1* — пружина; *2* — входной клапан; *3* — мембрана; *4* — нагрузочная пружина; *5* — винт настройки; *6* — отверстие; *7* — клапан сброса давления; $p_{вх}$ и $p_{вых}$ — входное и выходное давления.

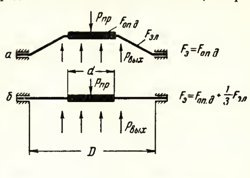
ное отверстие, но выходное давление от этого не понизится. Однако такие редукторы широко применяют на линии питания регуляторов, в которых всегда имеется расход воздуха.

Для подачи давления в замкнутую систему, например в камеру задания регулятора АУС, редукторы без сброса воздуха непригодны.

В регуляторе со сбросом воздуха (рис. 8. 6, *б*) имеется дополнительный клапан *7*, который открывается, когда сила, действующая на мембрану снизу со стороны выходного давления, становится больше силы натяжения нагрузочной пружины. Клапан для сброса воздуха срабатывает также и при ослаблении пружины *4*, когда требуется понизить выходное давление. Этот же клапан является предохранительным. Он срабатывает в случае превышения выходного давления над заданным, что может произойти от неполного закрытия входного клапана. Редуктор со сбросом воздуха пригоден для питания замкнутых систем без расхода воздуха.

В описываемых редукторах выходное давление при увеличении входного несколько возрастает и наоборот. Объясняется это тем,

что с прогибом изменяется эффективная площадь мембраны. На рис. 8. 7 показаны три положения мембраны с опорным диском, диаметр которого составляет 80% от диаметра мембраны (ее незажатой части). Как видно, эффективная площадь мембраны максимальна при полном прогибе вниз; в среднем положении она меньше, а при максимальном прогибе вверх минимальна, так как ее эластичная часть работает на растяжение. Вместе с изменением эффективной площади изменяется сила, с которой мембрана действует на опорный диск, а следовательно, и на пружину. При увеличении входного давления, когда клапан должен прикрыться в большей степени, мембрана прогибается вверх и ее эффективная площадь уменьшается. Следовательно, при одном и том же натяге пружины для равновесия сил должно увеличиться давление в полости под мембраной, которое является и выходным давлением редуктора.



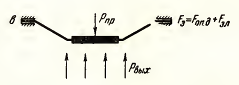


Рис. 8. 7. Изменение эффективной площади мембраны с опорным диском.

а — мембрана полностью выгнута вверх; б — мембрана в среднем положении; в — мембрана полностью выгнута вниз; $F_э$ — эффективная площадь мембраны; $F_{оп.\,д}$ — площадь опорного диска; $F_{эл}$ — площадь эластичной части мембраны; $p_{пр}$ — сила пружины; $p_{вых}$ — выходное давление редуктора.

Анализируя действие мембраны, можно видеть, что даже при неизменяющемся входном давлении, но при изменениях расхода воздуха, когда клапан должен иметь разные степени открытия, выходное давление не остается постоянным. При максимальном расходе, когда клапан должен быть полностью открыт, мембрана прогибается вниз, ее эффективная площадь возрастает, а выходное давление уменьшается. При уменьшении расхода мембрана прогибается вверх и выходное давление увеличивается. Это явление называется неравномерностью мембранного привода регулятора и свойственно всем мембранным П-регуляторам прямого действия. Эффективную площадь мембраны определяют по формуле

$$F_э = \frac{1}{3} \frac{\pi}{4} (D^2 + Dd + d^2), \qquad (8.9)$$

где D — диаметр окружности заделки мембраны;
d — диаметр опорного диска.

Для уменьшения неравномерности мембранного привода уменьшают ход клапана от полного открытия до полного закрытия, чтобы рабочий ход мембраны составлял лишь часть возможных ее перемещений и находился в средней зоне.

Степень изменения входного давления (неравномерность) от изменения расхода и входного давления может достигать 4—5% от величины заданного давления.

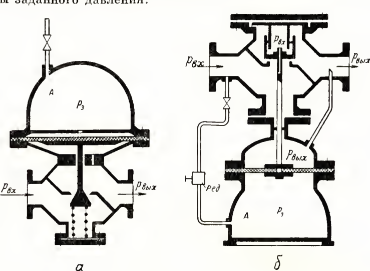


Рис. 8. 8. Регуляторы давления прямого действия с нагрузкой давлением.

а — с неуравновешенным плунжером; *б* — с уравновешенным плунжером; *А* — нагрузочная камера; *Ред* — редуктор; $p_{вх}$ и $p_{вых}$ — входное и выходное давления; $p_з$ — давление задания.

Применяемые в промышленности редукторы для снижения давления кислорода, водорода и других сжатых газов, транспортируемых в баллонах, имеют устройство, аналогичное описанным редукторам.

На рис. 8. 8 приведена схема двух промышленных регуляторов прямого действия с нагрузкой давлением. Применяются они в основном для редуцирования давления природного газа. На рис. 8. 8, *а* показана схема регулятора с неуравновешенным, а на рис. 8. 8, *б* с уравновешенным плунжером. Давление в нагрузочной камере *А* является давлением задания, так как его величиной определяется выходное давление. Давление в нагрузочную камеру подается через редуктор или игольчатый вентиль. При хорошей герметичности камеры *А* поданное в нее давление может сохраняться постоянным неограниченное время.

В регуляторах на мембрану действуют близкие по величине давления: одно — постоянное — со стороны нагрузочной камеры, другое — переменное — со стороны выхода из регулятора. Регулятор с неуравновешенным плунжером является пропорциональным (типа П) вследствие наличия пружины, а регулятор с уравновешенным плунжером — интегральным (типа И). Однако последний имеет

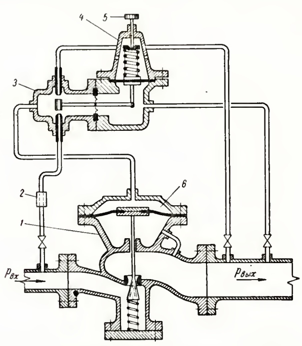


Рис. 8. 9. Регулятор давления газа прямого действия с нагрузкой переменным давлением — пилотный.

1 — регулятор; *2* — фильтр; *3* — клапанная коробка пилота; *4* — мембранный механизм пилота; *5* — винт настройки; *6* — нагрузочная камера; $p_{вх}$ и $p_{вых}$ — входное и выходное давления.

некоторую неравномерность из-за изменения эффективной площади мембраны при ее прогибах, о чем было сказано выше.

Поскольку в регуляторах с нагрузкой давлением мембрана не подвержена действию больших перепадов давления, эти регуляторы выпускают для работы при высоких (до 64 *кГ/см*²и выше) входных давлениях (при давлениях на выходе от 2 до 20 *кГ/см*²).

Оба вида регуляторов выпускаются размерами от 25 до 300 *мм*.

На рис. 8. 9 приведена схема регулятора давления газа прямого действия с нагрузкой переменным давлением, или пилотного. В этом регуляторе давление в нагрузочной камере изменяется вместе с из-

менением выходного давления, но с обратным знаком. Так, например, при увеличении выходного давления давление в нагрузочной камере уменьшается. Это увеличивает перепад на мембране и, следовательно, перестановочную силу, повышая тем самым чувствительность регулятора.

Пилот (его называют еще командным или управляющим регулятором) состоит из мембранного чувствительного механизма *4* и клапанной коробки *3*. Регулируемое выходное давление подается в ка-

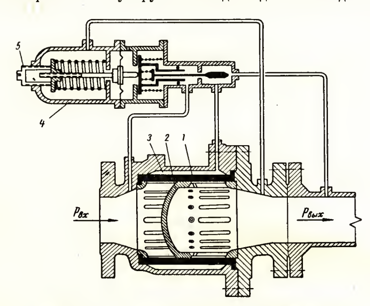


Рис. 8. 10. Пилотный регулятор с эластичной муфтой.

1 — эластичная муфта; *2* — глухая перегородка; *3* — нагрузочная камера; *4* — пилот; *5* — винт настройки; $p_{вх}$ и $p_{вых}$ — входное и выходное давления.

меру под мембраной. Последняя связана при помощи рычага с клапаном. В клапанную коробку подается газ высокого давления, откуда он поступает в нагрузочную камеру *6* и частично в линию сброса, соединенную с трубопроводом после регулятора (считая по направлению потока). Заданное значение давления устанавливается винтом *5* пилота. При нормальной работе регулятора давления с двух сторон мембраны близки по величине. При повышении $p_{вых}$ пилот уменьшает доступ газа в нагрузочную камеру и увеличивает сброс. В результате давление в нагрузочной камере уменьшается и плунжер перекрывает проходное отверстие. При уменьшении выходного давления пилот увеличивает давление в нагрузочной камере.

Из-за мембраны в пилоте, которая подвержена одностороннему давлению, эти регуляторы поддерживают выходное давление не

выше 15 *кГ/см*² при входном давлении до 64 *кГ/см*². Выпускаются они размером от 25 до 300 *мм.*

На рис. 8. 10 приведена схема современного пилотного регулятора, в котором стальные плунжер и седла заменены цилиндрической эластичной муфтой *1* из бензостойкой резины. Муфта облегчает цилиндрическую вставку с глухой перегородкой *2*. Газ из трубопровода высокого давления поступает через прорези во вставке (со стороны входа) под резиновую муфту, отжимает ее и проходит через образовавшийся кольцевой зазор между муфтой и глухой перегородкой и прорези вставки со стороны выхода в трубопровод низкого давления. Эластичная муфта окружена снаружи герметичной кольцевой нагрузочной камерой *3*, в которой пилотом *4* поддерживается нагрузочное давление. Действием пилота нагрузочное давление создается таким, при котором выходное давление поддерживается на заданном значении. И в этом регуляторе эластичная муфта, являющаяся мембраной, не подвержена высокому одностороннему давлению. Нагрузочное давление близко по величине к входному давлению. При отклонении регулируемого давления в сторону увеличения нагрузочное давление также увеличивается и, прижимая муфту, уменьшает сечение приходного кольцевого зазора. При уменьшении выходного давления нагрузочное давление уменьшается и подача газа увеличивается. Задание регулятора изменяется натяжением пружины пилота винтом *5*. Выпускаются эти регуляторы размерами (подсоединительных фланцев) от 25 до 300 *мм.* Они имеют большую пропускную способность и надежны в работе.

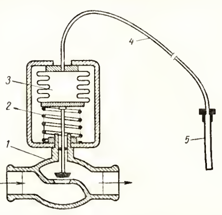


Рис. 8. 11. Регулятор температуры прямого действия с манометрическим датчиком.

1 — регулирующий клапан; *2* — пружина; *3* — сильфон; *4* — капилляр; *5* — термобаллон.

Поскольку пилотные устройства являются по существу П-регуляторами с пружинной нагрузкой, то в целом пилотные регуляторы также пропорциональные.

Регуляторы температуры прямого действия в нефтеперерабатывающей промышленности не получили большого распространения из-за их недостаточно высокой точности и ограниченных пределов измерения. В существующих регуляторах используются датчики, основанные на расширении тел. Чувствительные элементы датчиков могут развивать достаточно большую энергию.

23 Заказ 1042.

На рис. 8. 11 приведена схема П-регулятора температуры с манометрическим датчиком. Применяют жидкостные и паро-жидкостные термосистемы. Термобаллон устанавливают в аппарат или трубопровод, температуру среды в котором нужно регулировать. Регулирующий клапан, как это видно из рисунка, открывается и закрывается при изменениях давления в термосистеме, которое зависит от температуры термобаллона.

В регуляторах уровня прямого действия используется подъемная сила поплавка (рис. 8. 12).

Рис. 8. 12. Регулятор уровня прямого действия.

Рис. 8. 13. Регулятор расхода прямого действия.

1 — диафрагма; *2* — мембрана; *3* — винт настройки задания.

Связь между регулирующим клапаном и поплавком рычажная.

Регуляторы расхода прямого действия в промышленных условиях применяются редко. Основаны они на поддержании постоянного перепада давления на диафрагме или другом виде дроссельного устройства (рис. 8. 13). Задание регулятора может изменяться регулировкой пружины винтом *3*, которой определяется положение регулирующего клапана. Поскольку перепад на диафрагме *1* остается постоянным (при неизменном давлении на входе), то, следовательно, будет постоянным и расход жидкости или газа. Такие регуляторы используются для поддержания постоянства расхода через аппараты, сопротивление потоку которых не остается постоянным.

§ 4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Основным и наиболее распространенным исполнительным механизмом регуляторов пневматического действия является регулирующий клапан с мембранным приводом, менее распространенным — клапан с поршневым приводом.

Действие регулирующего клапана состоит в перемещении плунжера, перекрывающего проходное сечение в соответствии с изменениями командного давления воздуха над мембраной привода клапана (рис. 8. 14). При увеличении давления воздуха над мембраной шток вместе с плунжером движется вниз и клапан перекрывается. При уменьшении давления воздуха силой пружины плунжер приподнимается и клапан открывается. Существует очень большое число разновидностей регулирующих клапанов. Различают их по присоединительным размерам, производительности, условному давлению, на которое рассчитан корпус, по виду плунжера, по материалу корпуса в зависимости от коррозийности регулируемой среды, по рабочей температуре и некоторым другим признакам.

В промышленных условиях применяют клапаны размером от $D_у = 6$ *мм* до $D_у = 300$ *мм*. Лишь в редких случаях можно встретить клапаны меньших и бо́льших размеров. Наиболее распространенным по условному давлению являются клапаны, рассчитанные на $p_у = 16$, 25, 40 и 160 $кГ/см^2$. Клапаны на более высокие давления являются уже специальными.

По виду запорного устройства пары плунжер — седла клапаны различают односедельные и двухседельные.

Для односедельных запорных устройств клапанов (см. рис. 8. 8 и 8. 11) характерна неуравновешенность плунжера. В них на плунжер действует сила давления среды, направленная противоположно по отношению к силе мембранного привода. При высоких давлениях сила среды может быть настолько большой, что давления воздуха в 1 $кГ/см^2$ над мембраной будет недостаточно для перемещения плунжера. Поэтому односедельные неуравновешенные плунжеры применяют лишь в клапанах малого размера или при низких давлениях среды.

Рис. 8. 14. Регулирующий клапан с пневматическим мембранным приводом.

1 — мембрана; *2* — пружина; *3* — шток; *4* — плунжер; *5* — корпус клапана.

Двухседельные запорные устройства клапанов (рис. 8. 14) имеют почти уравновешенный плунжер. Как это видно из рисунка, в них давление потока передается верхней и нижней частям плунжера в противоположном направлении. Но из-за конструктивных условий

полное уравновешивание сил не достигается, так как сборка требует, чтобы нижняя часть плунжера могла быть пропущена через верхнее седло. Существуют, однако, и односедельные клапаны с уравновешенным плунжером, конструкция которого такая же, как у плунжера, описанного выше регулятора прямого действия (см. рис. 8. 8, *б*).

По конструкции плунжера клапаны бывают игольчатые (форма плунжера напоминает острие иглы), тарельчатые (плунжер плоский, рис. 8. 12), с треугольными проходами (рис. 8. 14), со стержневым плунжером (рис. 8. 15). В зависимости от действия плунжера клапаны различают нормально открытые и нормально закрытые.

Изображенные на рис. 8. 14 и 8. 15 клапаны нормально открытые. В них при отсутствии давления воздуха над мембраной привода плунжер приподнят, т. е. клапан открыт. Такие клапаны называют еще типа ВЗ от слов «воздух закрывает».

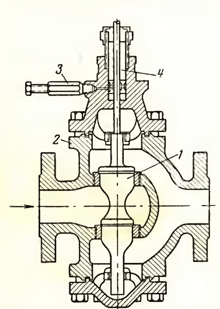


Рис. 8. 15. Двухседельный клапан со стержневым плунжером.

1 — плунжер стержневой; *2* — корпус; *3* — лубрикатор; *4* — сальник штока.

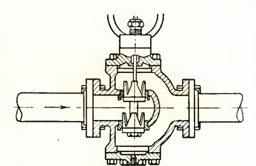


Рис. 8. 16. Регулирующий клапан типа ВО с треугольными проходами.

На рис. 8. 16 показана конструкция нормально закрытого клапана, который открывается при увеличении давления воздуха над мембраной и поэтому называется еще типа ВО от слов «воздух открывает».

Большое значение имеет форма плунжера, от которой зависит расходная характеристика клапана, т. е. зависимость между ходом плунжера и количеством жидкости, пара или газа, протекающих через клапан в единицу времени.

Расход жидкости, протекающей через клапан, можно выразить уравнением расхода для диафрагмы [см. гл. 4, уравнение (4. 12)]:

$$Q = \alpha F \sqrt{\frac{2g\,\Delta p}{\gamma}}\ м^3/сек,$$

поскольку клапан также можно рассматривать как дроссельное устройство, установленное в трубопроводе. Разница состоит в том, что проходное сечение клапана F не остается постоянным, а изменяется вместе с перемещением плунжера.

Этому уравнению можно придать вид:

$$Q = C \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\gamma}}, \tag{8.10}$$

где Q — расход жидкости в $м^3/ч$;
p_1 — абсолютное давление перед клапаном в $кГ/см^2$;
p_2 — абсолютное давление после клапана в $кГ/см^2$;
γ — удельный вес жидкости в $кГ/м^3$;
C — коэффициент производительности, причем

$$C = k\alpha F\sqrt{2g},$$

k — коэффициент, учитывающий изменение размерности.

Из формулы (8. 10) следует, что коэффициент производительности C по величине равен расходу жидкости удельного веса 1 $Г/см^3$ (воды) при разности давлений до и после клапана 1 $кГ/см^2$.

Величина C характерна для каждого регулирующего клапана и зависит от его размера и конструкции плунжера; она может поэтому служить для сравнения и оценки производительности различных клапанов.

Для каждого вида клапана коэффициент C определяют опытным путем при полном открытии клапана; его значения приводятся в соответствующих справочных таблицах и в паспортах клапанов. Это обстоятельство дает возможность легко выбрать требуемый размер клапана по вычисленному теоретически значению C для заданной максимальной производительности.

Коэффициент производительности C определяют по одной из следующих формул:

для жидкостей

$$C = \frac{Q}{\sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\gamma}}}; \tag{8.11}$$

для насыщенного и перегретого водяного пара при $p_2 > 0{,}5\,p_1$

$$C = \frac{W}{31{,}6\,\varepsilon\sqrt{(p_1 - p_2)\gamma_1}}, \tag{8.12}$$

при $p_2 \leqslant 0{,}5\, p_1$

$$C = \frac{W}{17{,}3\sqrt{p_1 \gamma_1}}; \tag{8.13}$$

для газов при $p_2 > 0{,}5\ p_1$

$$C = \frac{Q}{514\,\varepsilon\sqrt{\dfrac{(p_1 - p_2)\,p_1}{\gamma_н\,(273+t)}}}, \tag{8.14}$$

при $p_2 \leqslant 0{,}5\, p_1$

$$C = \frac{Q}{280\,p_1\sqrt{\dfrac{1}{\gamma_н\,(273+t)}}}, \tag{8.15}$$

где p_1 — абсолютное давление до клапана в *кГ/см²*;
p_2 — абсолютное давление после клапанов *кГ/см²*;
Q — расход жидкости в *м³/ч* или рэсход газа в *м³/ч* (при 0° С и 760 *мм рт. ст.*);
W — расход пара в *кГ/ч*;
γ — удельный вес жидкости в *кГ/м³*;
γ_1 — удельный вес пара в рабочих условиях в *кГ/м³*;
$\gamma_н$ — удельный вес газа при 0° С и 760 *мм рт. ст.* в *кГ/м³*;
ε — поправочный коэффициент на расширение струи газа или пара.

При $\frac{p_1 - p_2}{p_1} \leqslant 0{,}08$

$$\varepsilon = 1;$$

при $\frac{p_1 - p_2}{p_1} > 0{,}08$

$$\varepsilon = 1 - 0{,}46\,\frac{p_1 - p_2}{p_1}. \tag{8.16}$$

Значения коэффициентов C для выпускаемых отечественной промышленностью регулирующих клапанов приведены в приложении 9.

Расходная характеристика клапана при постоянном перепаде называется **идеальной**, а при переменном — **рабочей**. Регулирующие клапаны выпускаются с различными расходными характеристиками.

Клапаны с тарельчатым плунжером имеют характеристику, приведенную на рис. 8. 17 (кривая *1*). Как видно из рисунка при ходе плунжера на 40% от полного хода расход быстро увеличивается, почти до 90% от максимальной производительности.

Клапаны с плунжером и треугольными проходами имеют тоже нелинейную параболическую характеристику (кривая *3*).

Выпускаются клапаны еще с линейной (кривая *2*) и логарифмической (кривая *4*) характеристиками, что достигается соответствующими формами плунжеров. Логарифмическая характеристика близка к параболической.

При работе идеальная расходная характеристика не сохраняется, так как перепад на клапане обычно не остается постоянным. С увеличением степени открытия перепад, как правило, уменьшается. На рис. 8. 18 показан график рабочих характеристик клапана, имеющего линейную идеальную характеристику при некотором перепаде H, принятом за единицу. Как видно, при уменьшении перепада характеристика искажается все больше и больше.

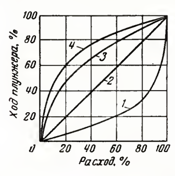


Рис. 8. 17. Расходные характеристики регулирующих клапанов.

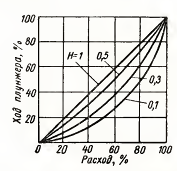


Рис. 8. 18. Рабочие характеристики клапана.

Чтобы избежать сильного искажения расходных характеристик, следует выбрать клапан такой, у которого даже при максимальном открытии (расходе) перепад в реальных условиях оставался бы по возможности ближе к его значению при минимальном открытии. Это достигается уменьшением сопротивления трубопровода до и после клапана. Этим объясняется и то, что условный диаметр регулирующего клапана обычно принимается в 1,5—2 раза меньше диаметра подводящего трубопровода.

Выбор клапана с той или иной расходной характеристикой зависит главным образом от свойств объекта регулирования. Так, например, регулятор, работающий в системе с объектом, имеющим большое время разгона (большую емкость), может быть настроен на малые пределы пропорциональности, и в этом случае можно применять клапаны любой характеристики, в том числе и тарельчатые.

Многие системы регулирования требуют для поддержания параметра на заданном значении при колебаниях нагрузки объекта равномерного изменения расхода через клапан. Это относится к системам регулирования температуры, расхода и некоторых других параметров, когда недопустимы значительные отклонения от

заданного значения. В этих случаях необходимо применять клапаны с параболической или с логарифмической характеристикой.

Важной, но еще недостаточно изученной характеристикой регулирующих клапанов является их регулирующая способность, оцениваемая величиной L (см. гл. 7, стр. 292). Для клапанов с тарельчатым плунжером эта величина больше, чем для других типов. В связи с этим в целях уменьшения остаточного отклонения регулируемой величины, для регулирования давления газа и других сред в объектах с большой емкостью и самовыравниванием при помощи П-регуляторов, часто применяют клапаны тарельчатого типа.

Как правило, все регулирующие клапаны не являются запорными органами, т. е. такими, которые при полном закрытии герметично прикрывают проходное сечение. Обычно клапаны в закрытом положении пропускают примерно до 5% количества потока от максимальной производительности. Поэтому для полного отключения клапана устанавливают запорные вентили, задвижки или краны до и после него. Кроме того, предусматривают обводную линию (байпас) около клапана для возможности ручного регулирования при отключении его в случае неисправности.

§ 5. ПОЗИЦИОННЫЕ РЕЛЕ РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНОВ

Для того чтобы силы трения в подвижной системе клапана не оказывали вредного влияния на его действие, иногда применяют так называемые *позиционные реле*, представляющие собой пневматические регулирующие устройства пропорционального типа с обратной связью. Назначение позиционных реле регулировать подачу сжатого воздуха в мембранный привод и перемещать клапан в зависимости от выходного давления командного регулятора. Схемы двух видов позиционных реле приведены на рис. 8. 19. Обе схемы действуют одинаково. При установившемся давлении в линии от командного регулятора на выходе из реле устанавливается равное давление, которое передается мембранному приводу клапана. При увеличении давления от регулятора увеличивается подача воздуха на мембранный привод. Если перемещению штока и мембраны клапана будут препятствовать силы трения, то обратная связь не действует и над мембраной быстро возрастает давление. Когда это давление достигает значения, при котором силы трения будут преодолены, то шток и мембрана движутся вниз, начинает действовать обратная связь и управляющий клапан реле прекратит повышать давление, поступающее на мембраны привода. Аналогично действуют реле и при понижении давления воздуха после регулятора. Питаются реле сжатым воздухом при давлении 1,5—2 $кГ/см^2$, т. е. несколько большем, чем обычные регуляторы, что позволяет мембране привода развить силу, достаточную для преодоления сил трения в подвижной системе клапана.

Позиционные реле применяют в тех случаях, когда при эксплуатации клапана силы трения могут значительно возрасти, например, от действия среды на смазку и сальниковую набивку, которые могут высохнуть, при отложениях твердых частиц на штоки и плунжеры и т. п. Таким явлениям подвержены в большей степени клапаны больших размеров ($D_у$ свыше 150 *мм*).

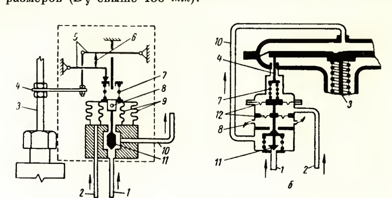


Рис. 8. 19. Схемы позиционных реле.

а — рычажное; *б* — мембранное; *1* — линия питания воздухом давлением 1,5—2 $кГ/см^2$; *2* — линия воздуха от регулятора; *3* — шток клапана; *4* — рычаг обратной связи; *5* — рычаги; *6* — жесткая перемычка; *7* — пружина обратной связи; *8* — отверстия для сброса воздуха в атмосферу; *9* — сильфоны; *10* — линия воздуха к мембранному приводу; *11* — управляющий клапан; *12* — мембраны.

Применение позиционных реле приобретает большое значение тогда, когда наряду с возросшими силами трения выходное давление регулятора изменяется на очень малую величину, недостаточную для преодоления сопротивления клапана, например, при работе регулятора с большой неравномерностью.

Никаких принципиальных изменений в характеристики клапана и регулятора позиционное реле не вносит. Оно лишь несколько увеличивает скорость срабатывания клапана за счет исключения объема надмембранной полости из системы командного воздуха регулятора.

§ 6. ПИТАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ И ДАТЧИКОВ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ И ГАЗОМ

На нефтеперерабатывающих заводах с большим числом пневматических регуляторов и датчиков, установленных в разных местах, имеются специальные центральные компрессорные установки. Они состоят из одного или двух воздушных компрессоров. Установки должны обеспечивать круглосуточную подачу сжатого воздуха

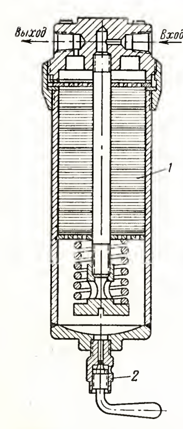


Рис. 8. 20. Фильтр для очистки сжатого воздуха.
1 — фетровые прокладки; 2 — вентиль для продувки.

при давлении 3—5 *кГ/см*². Сжатый воздух подвергается осушке в осушительных аппаратах. Эти аппараты заполняются адсорбентом (силикагелем или окисью алюминия), поглощающим влагу. После насыщения адсорбента влагой его подвергают регенерации путем продувки горячим воздухом.

При небольшом числе регуляторов иногда применяют небольшие воздушные компрессоры, устанавливаемые поблизости от регуляторов.

На газораспределительных станциях магистральных газопроводов регуляторы питаются не сжатым воздухом, а газом из газопровода. Природный газ состоит в основном из метана, который не имеет коррозийных свойств и вполне заменяет сжатый воздух. Его недостаток — взрывоопасность и вредность для обслуживающего персонала. Там, где применяют газ, принимают соответствующие меры предосторожности.

Расход воздуха или газа на один регулятор или один датчик составляет примерно 0,5 *м³/ч* (при давлении 760 *мм рт. ст.* и температуре 0° С).

Несмотря на подготовку воздуха или газа, перед каждым регулятором, датчиком или другим пневматическим устройством устанавливают небольшой фильтр (8. 20) и редуктор. Описание редуктора было приведено выше.

§ 7. ПРОВЕРКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ И ВРЕМЕНИ ИЗОДРОМА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

ПИ-регулятор типа 04

Схема проверки приведена на рис. 8. 21. Прибор включают в работу и проверяют регулировку его пневматической части по инструкции. Устанавливают диаграмму с равномерными давлениями 0—100%. Механизм вращения диаграммы останавливают. При испытаниях диаграмма не должна вращаться. Перо чернилами не заполняют.

Проверка неравномерности

Контрольный указатель устанавливают на делении 50 по диаграмме. Увеличивая давление пресса, подводят стрелку с пером к контрольному указателю и, пользуясь действием изодрома, устанавливают выходное давление равным 0,5 *кГ/см*². Выключают действие изодрома, установив шкалу его настройки на 10.

Устанавливают шкалу настройки неравномерности на деление 20. Постепенно (можно с перерывами), увеличивая давление пресса, отводят стрелку с пером от контрольного указателя, записывая изменение выходного давления через каждые 2% хода стрелки. То же проделывают при снижении давления пресса. После этого опять совмещают стрелку с контрольным указателем и подрегулировывают давление на выходе до 0,5 *кГ/см*². Устанавливают шкалу настройки неравномерности на деление 40 и повторяют описанные выше операции. То же проделывают при настройках неравномерности на 60, 80, 100 и 150%, причем записывают значения выходного давления уже не через каждые 2%, а через 5 и 10%.

Рис. 8. 21. Схема испытания регулятора типа 04.

1 — пресс для поверки манометров; *2* — манометр образцовый со шкалой 0—10 *кГ/см*²; *3* — бачок объемом 1 *л*; *4* — образцовый манометр со шкалой 0—1,0 *кГ/см*²; *5* — регулятор давления типа 04-МСТМ-410; *6* — редуктор; *7* — фильтр; *8* — линия питания воздухом давлением 1,5—2 *кГ/см*².

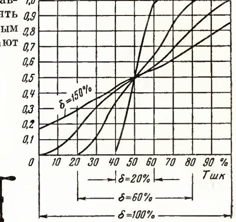


Рис. 8. 22. График для определения неравномерности регулятора.

По полученным данным строят график зависимости выходного давления $p_{вых}$ от приращения перемещения стрелки с пером (рис. 8. 22). Неравномерность определяют по графику как интервал $T_{шк}$ % на оси абсцисс, в пределах которого выходное давление изменяется от 0 до 1 *кГ/см*². При настройке на 150% (свыше 100%) неравномер-

ность δ определяют из отношения, которое справедливо и для всех других настроек:

$$\delta = \frac{\Delta T_{шк}}{\Delta p_{вых}} \%,$$

где $\Delta T_{шк}$ — отклонение стрелки с пером в процентах от всей шкалы;

$\Delta p_{вых}$ — приращение (или уменьшение) выходного давления в *кГ/см²*.

Проверка времени изодрома

Устанавливают шкалу настройки времени изодрома на деление 4, шкалу настройки неравномерности на деление 100%. Изменяя давление в прессе, подводят стрелку с пером к контрольному указателю, установленному на середине шкалы диаграммы (деление 50%). Устанавливают стрелку с пером на контрольную точку, при которой выходное давление не должно изменяться, причем оно должно быть в пределах 0,4—0,6 *кГ/см²*. Контрольная точка может не совпадать с положением контрольного указателя примерно на 2—3 *мм*. Если это расхождение больше, то следует отрегулировать контрольную точку по инструкции, затем выждать 2—3 *мин* и убедиться, что выходное давление не изменяется. После этого быстро изменяют давление в прессе настолько, чтобы выходное давление повысилось или понизилось на 0,1 *кГ/см²*. В момент прекращения быстрого изменения выходного давления на 0,1 *кГ/см²* включают секундомер и измеряют время, в течение которого выходное давление повысится или понизится еще на 0,1 *кГ/см²*. Это и будет время изодрома. Аналогично определяют время изодрома при других настройках.

Шкала настройки времени изодрома регуляторов типа 04 имеет деления от 1 до 10. Делению 1 соответствует минимальное время около 6—8 *сек*; делениям 2, 4, 6, 8 и 10 — соответственно около 20 *сек*, 1 *мин*, 2 *мин*, 5 *мин* и более 20 *мин*. Считают, что на делении 10 время изодрома бесконечно велико, т. е. действие изодрома прекращается.

При проверке времени изодрома для получения быстрого изменения выходного давления на 0,1 *кГ/см²* можно, не изменяя положения стрелки с пером, быстро перемещать вручную контрольный указатель.

Время изодрома можно определить еще, не прибегая к предварительному быстрому изменению выходного давления точно на 0,1 *кГ/см²*. Такое изменение должно быть, но оно может отличаться от 0,1 *кГ/см²*. Тогда время изодрома T_i определяют по формуле

$$T_i = \frac{\Delta p_{пр}}{\Delta p_{вых}}\, t, \qquad (8.17)$$

где $\Delta p_{пр}$ — предварительное быстрое изменение выходного давления;

$\Delta p_{вых}$ — изменение выходного давления за время t.

Измерение времени t должно прекращаться при достижении выходным давлением 0,1 и 1,0 *кГ/см²*.

ПИ-регулятор АУС

Схема проверки приведена на рис. 8. 23. Регулятор включают и проверяют его действие по инструкции.

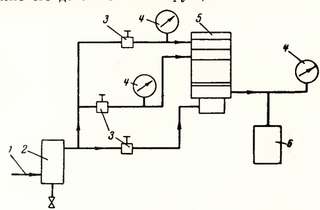


Рис. 8. 23. Схема испытания регулятора АУС.

1 — линия питания воздухом давлением 1,5—2 *кГ/см²*; *2* — фильтр воздуха; *3* — редуктор; *4* — образцовый манометр со шкалой 0—1,5 *кГ/см²*; *5* — регулирующий блок АУС типа 4РБ-32А; *6* — бачок объемом 1 *л*.

Проверка неравномерности

Устанавливают шкалу настройки неравномерности на деление 50% и шкалу времени изодрома на 2 *мин*. Подают в камеру задания давление воздуха 0,6 *кГ/см²*. Увеличивают давление в камере датчика примерно до 0,6 *кГ/см²*, когда выходное давление не будет изменяться и будет около 0,6 *кГ/см²*. После этого выключают действие изодрома, установив шкалу его настройки на 100 *мин*.

Далее необходимо определить зависимость выходного давления от изменения давления в камере датчика при разных настройках неравномерности. По полученным данным строят график, аналогичный приведенному на рис. 8. 17. В этом графике вместо $T_{шн}$ % по оси абсцисс откладывают давление в камере датчика (p_g), причем за 0% принимают давление 0 *кГ/см²* и за 100% давление 1 *кГ/см²*. Неравномерность определяют по графику или по формуле

$$\delta = \frac{\Delta p_{д}}{\Delta p_{вых}} \, 100\%,$$

где $\Delta p_{д}$ — изменения давления в камере датчика в *кГ/см²*;
$\Delta p_{вых}$ — изменения выходного давления в *кГ/см²*.

Проверка времени изодрома

Устанавливают шкалу настройки изодрома на 3 *сек* и шкалу неравномерности на 100%. Подают в камеру задания давление 0,6 *кГ/см²*. Увеличивают давление в камере датчика до значения 0,6 *кГ/см²* или близкое к нему, но такое, при котором выходное давление не изменяется. При этом выходное давление надо отрегулировать, пользуясь действием изодрома, так, чтобы оно было в пределах 0,55—0,65 *кГ/см²*. Затем быстро превышают давление в камере датчика на 0,1 *кГ/см²* и в этот момент включают секундомер. Измеряют время, в течение которого выходное давление повысится еще на 0,1 *кГ/см²*. Это и будет временем изодрома.

Аналогично проверяют время изодрома и при других настройках Определяют разницу между измеренными значениями и настройкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерс В. Р., Пантаев Н. Ф. Автоматическое регулирование процессов переработки нефти. Гостоптехиздат, 1954.

2. Пантаев Н. Ф., Дианов В. Г. Автоматическое регулирование в нефтяной промышленности. Гостоптехиздат, 1959.

3. Березовец Г. Т., Малый А. Л., Наджафов Э. М. Приборы пневматической агрегатной унифицированной системы. Гостоптехиздат, 1960.

4. Сладков С. П. Контрольно-измерительные приборы и автоматика в городском газовом хозяйстве. Изд. Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1960.

5. Прусенко В. С. Элементы пневмоавтоматики для регулирования тепловых процессов. Госэнергоиздат, 1961.

6. Заринский О. Н. Регуляторы прямого действия. ЦИНТИМАШ, 1961.

7. Аранович В. В., Слободкин М. С. Арматура регулирующая и запорная. Машгиз, 1953.

ГЛАВА 9

ВЫБОР, ПРИМЕНЕНИЕ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

§ 1. ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ

При выборе приборов контроля параметров руководствуются следующими основными положениями.

1. Приборы должны обеспечить необходимую точность измерения, быть достаточно быстро действующими и надежными в работе.

2. Показывающие приборы должны иметь наглядную шкалу и указатель. Самопишущие должны регистрировать показания в виде четкой хорошо различимой кривой.

3. Местные приборы должны быть легко доступными для наблюдения за их показаниями.

4. Погрешность датчиков с телепередачей не должна выходить за допустимые пределы при изменениях внешних условий: окружающей температуры, барометрического давления, наличия вибрации и т. п.

5. Защитные трубки ртутных термометров, термопар, термометров сопротивления и термобаллонов должны быть достаточно прочными, рассчитанными на данные рабочие условия. Диафрагмы расходомеров должны иметь камеры и фланцы, рассчитанные на работу при требуемых давлении и температуре, и их установка должна отвечать требованиям соответствующих правил и нормалей.

При выборе приборов и средств автоматизации, кроме перечисленных выше положений, должны учитываться еще свойства объектов регулирования и регуляторов, чтобы системы регулирования были устойчивыми и процесс регулирования протекал качественно, без больших отклонений регулируемой величины от заданного значения.

При выборе приборов контроля и автоматизации необходимо также принимать во внимание их стоимость.

Многочисленные процессы переработки нефти и ее продуктов характерны повышенной пожаро- и взрывоопасностью, вызванной углеводородным составом нефти. Все помещения технологических

Перечень приборов, применяемых во взрывоопасных цехах нефтезаводов и газовых производств

Параметр	Местные	Дистанционные и с телепередачей	Регулирующие
Давление	Манометры и вакуумметры с трубчатой пружиной. Сильфонные манометры и вакуумметры. Мембранные манометры и вакуумметры. Жидкостные U-образные манометры, микроманометры и тягомеры. Дифференциальные манометры жидкостные, Электроконтактные манометры	Датчики — пружинные манометры с пневматической передачей показаний, работающие с вторичными приборами самопишущими и показывающими. Датчики — пружинные манометры с электрической передачей покааний (ограничено), работающие с вторичными приборами	Манометры пружинные самопишущие показывающие с пневматическим регулирующим устройством. Регуляторы и другие блоки АУС пневматического действия, работающие с датчиками давления. Регуляторы прямого действия.
Температура	Ртутно-технические термометры. Биметаллические термометры (ограничено). Оптические пирометры и пирометры полного излучения (для периодических измерений)	Манометрические термометры с длинным капилляром. Манометрические термометры с пневматической передачей показаний, работающие с вторичными приборами самопишущими и показывающими. Термоэлектрические пирометры — потенциометры самопишущие и показывающие. Термометры сопротивления — электронные мосты уравновешенные самопишущие показывающие.	Манометричеслпе термометры с пневматическим регулирующим устройством. Электронные потенциометры и мосты с пневматическими регулирующими устройствами. Регуляторы и другие блоки АУС пневматические, работающие с пневмодатчиками температуры. Регуляторы прямого действия, дилатометрические и манометрические

Продолжение

Параметр	Местные	Дистанционные и с телепередачей	Регулирующие
		Электронные потенциометры и мосты с пневматической передачей показаний — пневмодатчики температуры. Электронные пневмопреобразователи — датчики температуры, работающие с термопарами (ограничено)	
Количество и расход	Объемные и скоростные счетчики. Ротаметры со стеклянной трубкой.	Расходомеры с дроссельными устройствами и поплавковыми дифференциальными манометрами. Дифференциальные манометры мембранные с пневматической передачей показаний, работающие с вторичными самопишущими и показывающими приборами. Ротаметры с пневматической передачей показаний (ограничено)	Расходомеры с дроссельными устройствами и дифференциальными поплавковыми манометрами с регулирующим устройством. Регуляторы и другие блоки АУС, работающие с пневмодатчиками расхода
Уровень	Уровнемерные стекла. Поплавковые показывающие устройства.	Уровнемеры с продувкой слоя жидкости. Различные поплавковые устройства внутреннего и внешнего монтажа с пневматической передачей показаний, работающие с вторичными самопишущими или показывающими приборами Дифференциальные манометры поплавковые с пневматической передачей показаний, работающие с вторичными самопишущими или показывающими приборами	Различные поплавковые устройства внутреннего и внешнего монтажа с пневматической передачей показаний. Дифференциальные манометры поплавковые с пневматическим регулирующим устройством

установок, в которых находятся аппаратура, насосы, компрессоры для сжатия газов, трубопроводы с арматурой и т. п., опасны в отношении возникновения пожара и взрыва. В них возможно образование взрывоопасной концентрации горючих газов в воздухе. При неосторожном обращении или от неисправности электрических устройств от возникновения искры в этих помещениях легко может вспыхнуть пожар и произойти взрыв с тяжелыми последствиями. На нефтезаводах очень строго должны выполняться все необходимые противопожарные мероприятия.

Требования пожаро- и взрывобезопасности предъявляются ко всему электрооборудованию, а также и к измерительным и регулирующим приборам и их вспомогательным устройствам. Поэтому наряду с приведенными выше основными положениями при выборе приборов контроля и автоматизации принимают во внимание условия их пожаро- и взрывобезопасности.

Все это привело к тому, что на нефтеперерабатывающих заводах применяемые приборы контроля и автоматизации отличаются от тех, которые используются, например, на тепловых электростанциях и многих химических производствах, хотя контролируемые и регулируемые параметры могут быть совершенно одинаковыми. Однако исключить приборы электрического действия невозможно, и они применяются на нефтезаводах. Но их или устанавливают в отгороженных взрывобезопасных помещениях, или же выполняют взрывобезопасными. В последнем случае электрические приборы могут быть смонтированы в любом помещении.

На современном этапе развития промышленности на нефтезаводах стремятся применять приборы пневматического действия, не требующие электропитания. Это относится в основном к приборам с телепередачей показаний и к автоматическим регуляторам.

В таблице приведен перечень применяемых в настоящее время групп приборов контроля и автоматизации основных параметров взрывоопасных цехов, нефтепроводов и газовых производств.

Приборы контроля состава и качества нефтепродуктов не включены в таблицу, так как они еще мало распространены и выбираются в каждом отдельном случае в зависимости от местных условий. В таблицу не вошли также приборы контроля и автоматизации вспомогательных не пожаро- и взрывоопасных цехов нефтезаводов, например парокотельных, электростанций, цехов водоснабжения и др. В таких цехах широко применяют приборы с электрической передачей показаний, регуляторы электрического действия и т. п. в обычном выполнении.

§ 2. СХЕМА КОНТРОЛЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

При проектировании какой-либо установки составляется ее схема контроля и автоматизации. Схема является исходным документом, отражающим все принятые точки контроля различных параметров,

приборы, которыми измеряются эти параметры, автоматические регуляторы, схемы включения регуляторов и связь их с технологической аппаратурой. Показана также принятая сигнализация об отклонении параметров от допустимых значений и т. д.

Характер всего оборудования средств контроля и автоматизации зависит от выбранной схемы. Схема определяет также и стоимость приобретения и монтажа оборудования.

Схема контроля и автоматизации должна содержать лишь необходимые приборы. Нельзя допускать применение приборов, которые при эксплуатации окажутся ненужными и не будут действовать. Особое внимание должно быть уделено правильному выбору схем автоматического регулирования, от действия которых во многом зависит ход технологического процесса. Схемы должны отражать опыт эксплуатации технологических процессов.

На рис. 9. 1 показана в упрощенном виде схема контроля и автоматизации блока ректификационной колонны установки вторичной перегонки крекинг-бензина*. Все условные обозначения приборов и вспомогательных устройств, применяемых в схеме, выполняются по ГОСТ 3925-59.

На рис. 9. 1 представлен наиболее распространенный вариант схемы с выносом всех приборов на нижнее поле чертежа и указанием их места расположения (по месту нахождения точки измерения, на щитах в отдельных шкафах, на центральном щите). Иногда схемы выполняют и без указания места расположения приборов. В последнем случае весь комплект приборов изображают вблизи точек контроля технологической аппаратуры (см. рис. 9. 2—9. 5).

По месту устанавливают показывающие манометры, термометры, счетчики количества и иногда датчики с телепередачей показаний и даже отдельные приборы и регуляторы внутри закрытых помещений (например, датчики давления и расхода, расходомеры и т. п. в помещениях насосных и др.). На щитах в отдельных шкафах располагают обычно датчики, которые по условиям их работы целесообразно устанавливать ближе к точкам контроля технологических аппаратов, находящихся вне закрытых помещений. Шкафы изготовляют из листовой стали с термоизоляцией и их обогревают в зимнее время водяным паром, пропускаемым через змеевик. В зависимости от расположения аппаратуры шкафы могут содержать щиты на один, два или несколько датчиков.

В последнее время на крупных установках вблизи технологических аппаратов (например, около ректификационной колонны) строят небольшие кирпичные помещения с отоплением, в которых располагают щиты с датчиками и приборами контроля качества.

На схеме контроля и автоматизации показывают функциональные связи между отдельными приборами и устройствами каждого

* По материалам разработок схем комплексной автоматизации СКБ АНН.

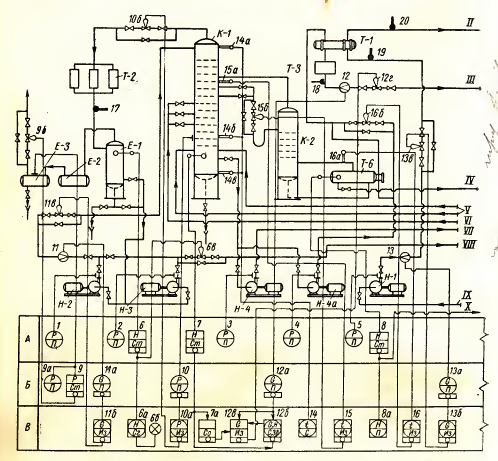


Рис. 9. 1. Схема контроля и автоматизации блока ректификационной колонны установки вторичной перегонки крекинг-бензина.

К-1 — ректификационная колонна; *К-2* — отпарная колонна; *Е-1* — водоотделитель; *Е-2* и *Е-3* — промежуточные емкости; *Т-1* — теплообменник; *Т-2* — конденсатор; *Т-3* — холодильник; *Т-6* — подогреватель; *Н-1* — насос сырьевой; *Н-2* — насос орошения; *Н-3* — насос бензиновый; *Н-4* — насос нижнего продукта; *Н-4а* — насос фракции ТС: *А* — приборы, установленные вблизи точек контроля (по месту); *Б* — приборы, установленные в шкафных щитах; *В* — приборы, установленные на центральном щите; *1, 2, 3, 4, 5* и *9а* — манометры показывающие; *6, 7* и *8* — регуляторы уровня; *6а* — сигнализатор уровня; *6б* — сигнальная лампа; *6в, 9б, 10б, 11в, 12г, 13в, 15б* и *16б* — регулирующие клапаны; *7а* — реле соотношения; *8а* — указатель уровня; *9* и *10а* — регуляторы давления; *10* — датчик давления; *11, 12* и *13* — диафрагмы расходомеров; *11а, 12а* и *13а* — датчики расхода; *12б* — вторичный прибор; *11б, 12в* и *13б* — регуляторы расхода; *14* — регистратор температуры; *14а, 14б, 14в, 15а* и *16а* — термопары; *15* и *16* — регуляторы температуры; *17, 18, 19* и *20* — термометры ртутные.

Линии потоков: *I* — газ с установки; *II* — сырье в печь; *III* — фракция ТС с установки; *IV* — средняя фракция в холодильник; *V* — нижний продукт из печи; *VI* — сырье из печи; *VII* — нижний продукт в печь; *VIII* — бензин с установки; *IX* — сырье на установку; *X* — сжатый воздух к регулирующему клапану *8а*.

Буквенные обозначения на приборах: *p* — давление; *t* — температура; *G* — расход; *H* — уровень; *П* — показывающий; *С* — самопишущий; *Сг* — сигнализирующий; *Зд* — задающий; *Из* — изодромный; *Ст* — статический (пропорциональный); *Со* — соотношение.

комплекта. Каждый прибор и устройство имеют свой номер позиции. Комплект приборов, выполняющих одну задачу, обозначается одним номером с дополнительными буквенными обозначениями. Приборы нумеруют последовательно по группам. Например, номера с 1 по 20 имеют показывающие манометры, с 21 по 35 приборы уровня, с 36 по 45 регуляторы давления и т. д. Это позволяет более удобно перечислять приборы в отдельной спецификации, которая обязательно составляется и прилагается к схеме. В спецификации перечисляют все позиции приборов, приведенных в схеме, и указывают рабочие условия, величины расчетных значений параметров, типы приборов, их краткие характеристики и наименование поставщика. Приборы, которые не выпускаются в данный момент промышленностью, в схемы контроля и автоматизации не включают.

Согласно схеме рис. 9. 1 для контроля и автоматизации блока ректификационной колонны вторичной перегонки предусмотрены следующие приборы и регуляторы.

1. Показывающие манометры *1*, *2*, *3*, *4* и *5*, контролирующие давление в выкидных линиях насосов.

2. Регулятор давления *9*, поддерживающий постоянное давление в емкости *Е-3* (а следовательно, и в *Е-1* и *Е-2*). Регулирующий клапан установлен на линии сброса газа из емкости *Е-3* в факельную линию (на схеме не показана).

3. Регулятор расхода *11б*, поддерживающий постоянство расхода орошения в колонну *К-1*. Работает в комплекте с датчиком. Диафрагма и регулирующий клапан установлены на линии выкида центробежного насоса *Н-2* для подачи орошения.

4. Регулятор уровня *6*, поддерживающий уровень бензина в водоотделителе *Е-1*. Регулирующий клапан установлен на линии выкида центробежного насоса *Н-3*, откачивающего бензин с установки. В комплект входят еще сигнализирующий прибор и сигнальная лампа.

5. Регулятор давления *10а* в колонне *К-1*, работающий в комплекте с датчиком. Регулирующий клапан установлен на линии выхода паров из колонны *К-1*.

6. Регулятор расхода *12в* фракции ТС-1 с установки с автоматической коррекцией от регулятора уровня *7*, низа колонны *К-1* (каскадное регулирование). В комплект входят реле соотношения, которым подбирают требуемую величину корректирующего сигнала, датчик расхода, вторичный самопишущий прибор для записи двух параметров (уровня и расхода) с задающим устройством и регулирующий клапан. Последний установлен на линии фракции ТС-1 после холодильника *Т-3*. Такая схема обеспечивает более равномерный отбор фракции ТС-1 и лучшее поддержание уровня в нижней части колонны *К-1*.

7. Регистратор температуры *14* для записи температуры в трех точках колонны *К-1*.

8. Регулятор температуры *15* паров в секции колонны *К-1*, в которую поступают пары из отпарной колонны *К-2*. Регулирующий клапан установлен на линии перепуска жидкого продукта из колонны *К-1* в колонну *К-2*. При повышении регулируемой температуры клапан открывается, переток увеличивается и наоборот. Такая схема поддерживает постоянство состава нижнего продукта колонны *К-2*.

9. Регулятор уровня *8* в подогревателе *Т-6*. В комплект входит показывающий прибор. Регулирующий клапан установлен на линии выхода средней фракции с установки после холодильника (на схеме не показан).

10. Регулятор температуры *16* паров, выходящих из подогревателя *Т-6*. Регулирующий клапан установлен на линии выкида центробежного насоса *Н-4а*, откачивающего фракцию ТС-1 с установки. Часть этой фракции, еще не охлажденной, используется как теплоноситель для подогревателя *Т-6*. С уменьшением регулируемой температуры клапан прикрывается и большая часть горячей фракции ТС-1 поступает в подогреватель и наоборот. Общий расход фракции ТС-1 при этом остается неизменным.

11. Регулятор расхода *13б* подачи сырья в печь. Работает в комплекте с датчиком. Диафрагма и регулирующий клапан установлены на линии выкида центробежного насоса *Н-1*.

12. Ртутные термометры *17*, *18*, *19* и *20* для контроля температуры в разных точках.

На схеме не показан прибор для контроля температур, измеряемых всеми термопарами установки. Для этого устанавливают дополнительный показывающий прибор (потенциометр) с панелью переключателей, при помощи которых в любой момент можно проверить показания всех других приборов, к которым подключены соответствующие термопары.

На рис. 9. 2—9. 5 приведены схемы автоматизации (без указания точек контроля параметров) некоторых технологических процессов.

При автоматизации печей (рис. 9. 2) применяют каскадные схемы регулирования температуры нагретой нефти или нефтепродукта при помощи регуляторов и блоков АУС. Регулирование подачи газа в топку ведется по температуре над перевалом с коррекцией по температуре выхода.

Выход датчиков температуры подается к регулирующим блокам и самопишущим вторичным приборам, а задание к регулятору температуры выхода из печи — непосредственно от задатчика вторичного прибора; выход этого регулятора поступает на вход блока суммирования. Другим входом блока суммирования является задание от самопишущего прибора регулятора температуры над перевалом. Выход блока суммирования является заданием регулятора температуры над перевалом. Выход последнего передается блоку предварения, а выход блока предварения — на регулирующий клапан. Таким образом, выход блока предварения, воздействующий на регули-

рующий клапан, зависит от температуры нефти на выходе из печи, а также от температуры и скорости ее изменения над перевалом.

Давление топливного газа и количество нефти, поступающей в печь, поддерживаются постоянными при помощи регуляторов. При работе парового насоса выход регулятора расхода подается к кла-

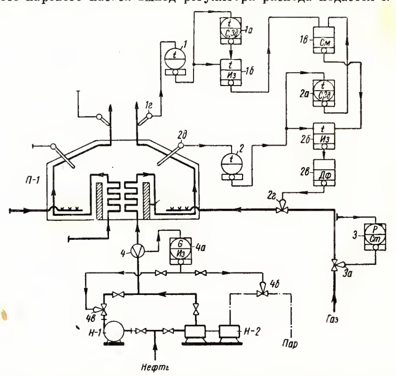


Рис. 9. 2. Схема автоматизации двухкамерной печи для подогрева нефти.

П-1 — печь для подогрева нефти дaухкамерная; *Н-1* — насос для нефти центробежный; *Н-2* — насос для нефти паровой; *1* и *2* — пневматические датчики температуры; *1а* и *2а* — вторичные приборы; *1б* и *2б* — регуляторы температуры; *1в* — блок суммирования; *1г* и *2д* — термопары; *2в* — дифференцирующий блок (предварение); *2г*, *3а*, *4б* и *4в* — регулирующие клапаны; *3* — регулятор давления; *4* — диафрагма; *4а* — регулятор расхода
Буквенные обозначения на приборах: *См* — суммирующий; *Дф* — дифференцирующий (остальные см. рис. 9. 1).

пану, установленному на линии подачи пара в насос, а при работе центробежного насоса — к клапану на линии выкида насоса. Схема обеспечивает поддержание постоянной температуры на выходе из печи.

На рис. 9. 3 приведена схема автоматизации блока атмосферной колонны установки первичной перегонки нефти. Каждый параметр поддерживается на заданном значении отдельным регулятором. В нижней части колонны регулируется уровень поплавковым регу-

лятором, клапан которого установлен на линии выкида центробежного насоса. В верхней части колонны регулируется температура путем изменения количества холодного орошения. В отпарной колонне поддерживается только уровень жидкости в нижней части путем изменения отбора фракции из этой колонны насосом. В водогазоот-

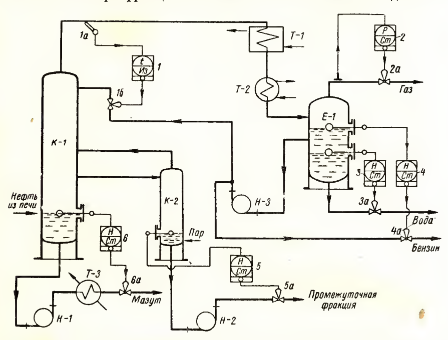


Рис. 9. 3. Схема автоматизации блока атмосферной ректификационной колонны.

К-1 — атмосферная колонна; *К-2* — отпарная колонна; *Е-1* — водогазоотделитель; *Т-1* — конденсатор; *Т-2* — холодильник; *Т-3* — теплообменник; *Н-1*, *Н-2*, *Н-3* — насосы центробежные; *1* — регулятор температуры; *1а* — термопара; *1б*, *2а*, *3а*, *4а*, *5а* и *6а* — регулирующие клапаны; *2* — регулятор давления; *3*, *4*, *5* и *6* — регуляторы уровня. Буквенные обозначения на приборах см. рис. 9. 1.

делителе сброс технологической воды осуществляется межфазовым регулятором уровня (нижним); уровень бензина поддерживается путем сброса бензина из линии выхода насоса орошения в товарную емкость (на схеме не показана), а давление путем сброса газа. Так как водогазоотделитель связан трубопроводами с колонной, то поддержание в нем давления распространяется и на колонну.

В схеме 9. 3 регуляторы связаны между собой только через технологические потоки. Внешних связей они не имеют. Это приводит к необходимости сравнительно часто изменять настройку задания регуляторов, чтобы устранить нежелательные изменения процесса при изменениях регулируемых параметров от внешних воздействий.

На рис. 9. 4 приведена схема регулирования расхода щелочи, подаваемой в поток нефти перед электродегидратором электрообессоливающей установки при помощи блоков АУС. Задание к регулятору подается от самопишущего прибора не непосредственно, а через блок суммирования. В последнем задание суммируется с выходной величиной датчика pH-метра, увеличенной или уменьшенной до требуемого значения в реле соотношения. Регулирующий кла-

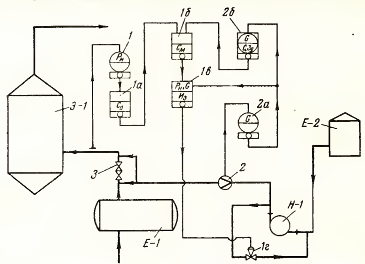


Рис. 9. 4. Схема регулирования подачи щелочи в нефть на электрообессоливающей установке.

Э-1 — электродегидратор; *Е-1* — емкость для раствора щелочи; *Е-2* — отстойник нефти; *Н-1* — насос центробежный для подачи щелочи в нефть; *1* — пневматический датчик — pH-метр; *1а* — блок соотношения; *1б* — блок суммирования; *1в* — регулятор величины pH с коррекцией по расходу; *2* — диафрагма расходомера; *2а* — пневматический датчик расхода; *2б* — вторичный прибор; *3* — смесительные задвижки.
Буквенные обозначения на приборах: pH — концентрация водородных ионов (остальные см. рис. 9. 1).

пан установлен на линии, соединяющей выкид насоса с его приемом. Для уменьшения расхода щелочи клапан открывается, а для увеличения прикрывается.

Так поддерживается требуемая величина pH смеси нефти со щелочью.

На рис. 9. 5 приведена схема автоматизации газораспределительной станции, в которой высокое давление газа из магистрального газопровода редуцируется до низкого давления потребителя в две ступени. При давлении входа 40 *кГ/см*² давление после первой ступени поддерживается около 18—20 *кГ/см*², а после второй около 3 *кГ/см*². В случае необходимости получения еще более низкого давления добавляется еще одна ступень из одного или двух регуля-

торов. На газораспределительных станциях применяют П- и ПИ-регуляторы непрямого и прямого действия, причем последние предпочтительнее, так как они требуют меньшего ухода. На станциях, работающих без персонала, имеется сигнализация о недопустимом повышении или понижении давления между ступенями и на выходе. Аварийный сигнал передается в дом, где живет оператор, обслуживающий станцию. В качестве датчиков сигнализации используются электроконтактные манометры.

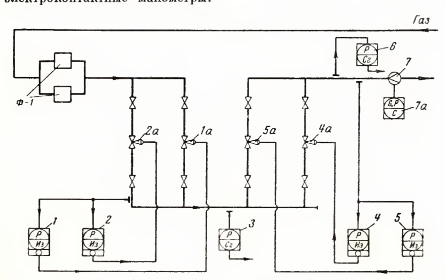


Рис. 9.5 Схема регулирования давления газа на газораспределительной станции.

Ф-1 — фильтры; *1* и *2* — регуляторы давления газа первой ступени редуцирования; *1а*, *2а*, *4а* и *5а* — регулирующие клапаны; *3* — датчик сигнализатора давления после первой ступени редуцирования; *4* и *5* — регуляторы давления газа второй ступени редуцирования; *6* — датчик сигнализатора давления после второй ступени редуцирования; *7* — диафрагма расходомера; *7а* — расходомер.
Буквенные обозначения на приборах см. рис. 9.1.

На рис. 9. 6 приведена одна из простейших типовых схем аварийной сигнализации о повышении и понижении давления, построенная на электромагнитных контактных реле и действующая от двух электроконтактных манометров.

Давление в промежуточном коллекторе между 1-й и 2-й ступенями редуцирования и давление на выходе измеряется электроконтактными сигнальными манометрами. Каждый из этих манометров имеет по два контакта, замыкающиеся при повышении давления (верхний) и понижении давления (нижний). Контакты устанавливают вручную на допустимые предельные значения давлений. Как видно из схемы, при недопустимом отклонении давления замыкается один из контактов манометров и это приводит к загоранию красной

лампы на щите станции и одновременно к загоранию красной лампы и включению звонка в доме оператора. По номеру лампы, загоревшейся на станции, оператор может судить о месте неисправности. Сигнал, передаваемый в дом оператора, является общим без расшифровки места аварии. Лампы зеленого цвета указывают на обеспеченность схем питанием электроэнергией. В тех случаях, когда

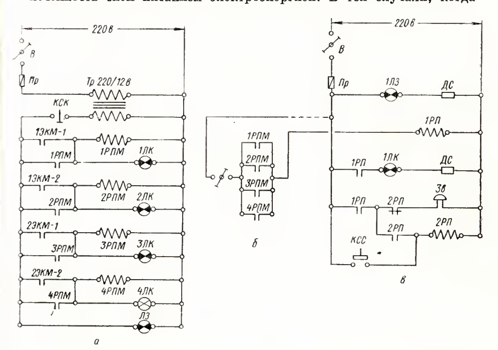


Рис. 9. 6. Электрическая схема аварийной сигнализации на газораспределительной станции.

а и *б* — схемы щита станции; *в* — схемы щита в доме оператора; *В* — выключатель; *Пр* — предохранитель; *Тр* — трансформатор, *КСК* — кнопка снятия контроля; *ЭКМ* — контакты электросигнального манометра; *РПМ* и *РП* — реле и их контакты; *ЛК* и *ЛЗ* — лампы красного и зеленого цвета; *ДС* — добавочное сопротивление; *Зв* — звонок; *КСС* — кнопка снятия звукового сигнала.

питание от сети может прерваться, предусматривается дополнительный источник питания от аккумуляторных батарей (на рис. 9.5 не показаны), включающихся автоматически при выключении питания от сети.

Количество разновидностей схем автоматизации очень велико, и описание даже основных схем заняло бы много места. Необходимо иметь в виду, что накопленный опыт позволяет дать указания об автоматизации отдельных процессов, технологических аппаратов и машин, поэтому при выборе схем и средств автоматизации необхо-

димо прежде всего ознакомиться с имеющимися материалами в этой области. Приведенные выше схемы, конечно, далеко не полностью охватывают все те случаи, с которыми можно встретиться в практике внедрения автоматического регулирования.

§ 3. ОБСЛУЖИВАНИЕ

На каждом заводе имеются цехи контрольно-измерительных приборов (КИП), задачей которых является поддержание всех средств контроля и автоматизации в полной исправности.

Цехи КИП имеют соответствующие кадры инженеров, техников и рабочих разных квалификаций. Начальник цеха КИП подчиняется непосредственно главному инженеру завода.

В цехах КИП имеется мастерская по ремонту приборов, а также лаборатория, в которой приборы испытывают и поверяют после ремонта Мастерская оснащена необходимым оборудованием: станками, стендами и инструментом. В лаборатории имеются образцовые меры и измерительные приборы, которыми поверяют рабочие приборы, применяемые на заводе. На крупных заводах с хорошо организованной службой КИП имеются группы ведомственного надзора, которые осуществляют поверку и клеймение приборов после их ремонта и следят за правильностью применения всех приборов на данном заводе. Группа ведомственного надзора возглавляется только лицами, имеющими специальную подготовку и сдавшими экзамены по знаниям основ метрологии и поверочного дела в органах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. Если на заводе нет группы ведомственного надзора, то для поверки приборов периодически приглашается госповеритель.

В цехах КИП обрабатывают диаграммы расходомеров пара, воды и нефтепродуктов, полученные данные передают соответствующим цехам завода для хозяйственных расчетов. Работники цеха КИП проводят всевозможные расчеты диафрагм расходомеров, регулирующих клапанов и т. п., а также выполняют небольшие проектные работы по КИП, требуемые при осуществлении на заводе реконструкций технологических установок, и по внедрению новой техники.

§ 4. НОВЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Развитие науки и техники сопровождается появлением все новых и новых технологических процессов получения различного вида продуктов, идущих на удовлетворение потребностей человека.

Необычайно возросла роль химии, а вместе с ней и нефтепереработки. Появились заводы, вырабатывающие спирт, каучук, полиэтилен и ряд продуктов для химических производств на базе нефтяного сырья.

Значительно возросли мощности технологических установок первичной перегонки нефти, крекингов и других процессов. Современный нефтеперерабатывающий завод представляет большой комплекс разнообразных технологических установок с большим числом вспомогательных цехов и служб.

Все это сопровождается ростом числа средств контроля и автоматизации технологических процессов. Лишь на одной крекинг-установке насчитываются сотни точек контроля температуры, давления, расхода и др. Значительно возросло число регуляторов. Оператору становится все труднее и труднее «обрабатывать» показания многочисленных приборов и на этой основе вносить коррективы и правильно направлять ход технологических процессов.

Значительно возросла потребность в централизации средств контроля для осуществления диспетчерского управления из одного пункта несколькими установками и даже всем заводом. В настоящее время уже выпускаются серийно совершенно новые средства контроля параметров и автоматизации технологических процессов.

К числу этих новых средств относятся в первую очередь машины централизованного контроля, называемые еще машинами сбора информации.

Действие этих машин состоит в следующем. В разных точках технологического процесса установлены датчики температуры, давления, расхода и других параметров. В этих датчиках измеряемая величина преобразовывается в электрическую величину, которая по проводам подается на вход машины централизованного контроля. В машине имеется переключающее устройство, при помощи которого каждый датчик поочередно подключается к измерительной схеме, например компенсационной типа потенциометра постоянного тока. В этой схеме измеряемая величина преобразовывается в угол поворота реохорда. Последний в свою очередь преобразовывается специальным устройством в другую электрическую величину, поступающую на вход блока автоматической цифровой регистрации, выходной величиной которого является цифровой результат измерения, записанный автоматической печатающей машинкой на бланке.

Последовательные переключения датчиков, измерение и печатание результата производятся автоматически и очень быстро. Цикл регистрации пятидесяти параметров длится около 2 *мин*. Значения всех этих параметров записываются в одну строку. Циклы регистрации могут повторяться через 15,30 *мин*, 1 или 2 *ч* и т. д. в зависимости от настройки машины. Так действует простейшая машина.

Большинство машин устроено сложнее и выполняет ряд дополнительных функций. Так, например, во многих машинах имеется устройство, выдающее световой (зажигание лампы красного цвета) или звуковой (звонок) сигнал об отклонении регистрируемых пара-

метров от допустимых значений, причем величина «уставки» этого допустимого значения может устанавливаться оператором вручную.

В машинах, контролирующих большое число точек (до 300), часть наиболее важных точек по выбору оператора измеряется, и их величины регистрируются на бланке. Другие точки не регистрируются, но контролируются, и лишь в случае отклонения любой из них от допустимого значения машина выдает сигнал тревоги.

Есть машины, в которых при отклонении параметра от нормального значения выдается командный сигнал для осуществления автоматического регулирования, причем величина его пропорциональна отклонению параметра.

Почти все машины имеют самопишущий прибор, на диаграмме которого могут регистрироваться показания до 12 точек, любых из числа контролируемых и выбираемых оператором. Кроме того, каждая контролируемая точка может подключаться вручную к показывающему прибору.

Имеются машины, выполняющие некоторые вычислительные операции. Например, подсчитывающие расход жидкости, газа и пара с автоматическим внесением поправок на отклонение рабочих условий (температуры и давления). В других машинах имеется устройство «запоминания», которое передает измеряемые величины на вход вычислительной машины, решающей ряд сложных задач, таких, например, как определение наиболее выгодного значения различных параметров процесса, определения стоимости продукции и т. п.

Важной задачей, разрешение которой позволит осуществить комплексную автоматизацию сложных технологических процессов, является создание управляющих электронно-вычислительных машин. Такие машины должны сопоставлять качественные показатели получаемых продуктов с их заданными значениями, находить оптимальные значения параметров и управлять процессами путем автоматической передачи командных сигналов исполнительным механизмом.

Применение машин централизованного контроля позволяет не устанавливать большое число разнообразных приборов. Отпадает надобность в больших щитах для приборов. Центр управления превращается в небольшой пульт.

Применение машин централизованного контроля возможно главным образом на базе использования датчиков с электрической передачей показаний. Это приводит к выводу, что в будущем вся система контроля и автоматического регулирования будет строиться из приборов электрического действия с широким использованием электроники.

Однако еще долго будут применяться приборы пневматического действия и в особенности автоматические регуляторы, как наиболее совершенные и безопасные в пожарном отношении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерс В. Р. Контрольно-измерительные приборы — вводный курс. Гостоптехиздат, 1959.

2. Автоматизация процессов нефтепереработки и нефтехимии. Сборник статей, вып. 1—2. Гостоптехиздат, 1962.

3. Астахов В. А. Проектирование и монтаж установок контроля и автоматики в нефтеперерабатывающей промышленности. Гостоптехиздат, 1952.

4. Шенброт И. М. Централизованный контроль технологических процессов. Госэнергоиздат, 1961.

5. Автоматическое управление. Перевод с англ. под ред. проф. В. В. Солодовникова. Изд. АН СССР, 1961.

6. Казьмин Г. И., Гвоздецкий Л. А., Касаткин В. А., Семенов Б. С. Нефтеперерабатывающие заводы США. Гостоптехиздат, 1962.

Приложения

Приложение 1

Градуировочная таблица термопары пластинородий — платина при температуре свободных концов 0° С, ГОСТ 3044-45, гр. ПП

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
					E, мв					
—	—	−0,055	0,109	—	—	—	—	—	—	—
0	0	0,057	0,115	0,176	0,237	0,301	0,366	0,432	0,500	0,569
100	0,640	0,712	0,786	0,861	0,937	1,014	1,093	1,173	1,254	1,337
200	1,421	1,507	1,596	1,684	1,772	1,861	1,950	2,040	2,130	2,220
300	2,311	2,402	2,494	2,586	2,678	2,773	2,866	2,960	3,054	3,149
400	3,244	3,339	3,435	3,531	3,627	3,723	3,819	3,916	4,014	4,112
500	4,211	4,311	4,410	4,509	4,609	4,709	4,810	4,911	5,012	5,113
600	5,214	5,316	4,419	5,522	5,625	5,728	5,832	5,936	6,041	6,146
700	6,251	6,356	6,462	6,568	6,675	6,782	6,889	6,996	7,104	7,214
800	7,323	7,432	7,451	7,651	7,761	7,871	7,982	8,093	8,205	8,317
900	8,429	8,541	8,654	8,767	8,881	8,995	9,109	9,223	9,338	9,453
1000	9,569	9,685	9,801	9,921	10,036	10,153	10,271	10,389	10,507	10,626
1100	10,745	10,864	10,984	11,104	11,224	11,345	11,466	11,587	11,709	11,831
1200	11,954	12,074	12,194	12,315	12,435	12,555	12,675	12,795	12,916	13,037
1300	13,158	13,279	13,399	13,520	13,640	13,760	13,880	14,000	14,121	14,241
1400	14,361	14,481	14 601	14,722	14,842	14,962	15,082	15,202	15,323	15,443
1500	15,563	15,683	15,925	15,804	16,045	16,165	16,285	16,405	16,528	16.646
1600	16,766	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Приложение 2

Градуировочная таблица термопары хромель — алюмель при температуре свободных концов 0° С, ГОСТ 3044-45, гр. ХА

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
					F, мв					
—	—	−0,39	−0,77	−1,14	−1,50	−1,86	—	—	—	—
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,29	14,72	15,14	15,56	15,98
400	16,40	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,22
500	20,65	21 08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,63	24,06	24,49
600	24,91	25,33	25,76	26,19	26,61	27,04	27,46	27,88	28,30	28,73
700	29,15	29,57	29,99	30,41	30,33	31,24	31,66	32,08	32,49	32,91
800	33,32	33,72	34,13	34,55	34,95	35,36	35,76	36,17	36,57	36,97
900	37,37	37,77	38,17	38,57	38,97	39,36	39,76	40,15	40,54	40,93
1000	41,32	41,71	42,09	42,48	42,87	43,26	43,64	44,02	44,40	44,78
1100	45,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Приложение 3

Градуированная таблица термопары хромель — копель при температуре свободных концов 0° С, ГОСТ 3044-45, гр. ХК

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
					E, мв					
—	—	−0,64	−1,27	−1,89	−2,50	−3,11	—	—	—	—
0	0	0,65	1,31	1,98	2,66	3,35	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,66	15,48	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,02	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,03	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Приложение 4

Градуировочная таблица платиновых термометров сопротивления, ГОСТ 6651-59, гр. 21

$R_0 = 46{,}00$ *ом*

t, °С	*R*, *ом*	*t*, °С	*R*, *ом*	*t*, °С	*R*, *ом*	*t*, °С	*R*, *ом*
−200	7,95	20	49,64	240	88,26	450	122,70
−190	9,96	30	51,45	250	89,96	460	124,28
−180	11,95	40	53,26	260	91,64	470	125,86
−170	13,93	50	55,06	270	93,33	480	127,43
−160	15,90	60	56,86	280	95,00	490	128,99
−150	17,85	70	58,65	290	96,68	500	130,55
−140	19,79	80	60,43	300	98,34	510	132,10
−130	21,72	90	62,21	310	100,01	520	133,65
−120	23,63	100	63,99	320	101,66	530	135,20
−110	25,54	110	65,76	330	103,31	540	136,73
−100	27,44	120	67,52	340	104,96	550	138,27
−90	29,33	130	69,28	350	106,60	560	139,79
−80	31,21	140	71,03	360	108,23	570	141,32
−70	33,08	150	72,78	370	109,86	580	142,83
−60	34,94	160	74,52	380	111,48	590	144,34
−50	36,80	170	76,26	390	113,10	600	145,85
−40	38,65	180	77,99	400	114,72	610	147,35
−30	40,50	190	79,71	410	116,32	620	148,84
−20	42,34	200	81,43	420	117,93	630	150,33
−10	44,17	210	83,15	430	119,52	640	151,81
0	46,00	220	84,86	440	121,11	650	153,30
10	47,82	230	86,56				

25 Заказ 1042.

Приложение 5

Градуировочная таблица платиновых термометров сопротивления, ГОСТ 6651-59, гр. 22

$R_0 = 100{,}00$ *ом*

t, °C	*R*, *ом*	*t*, °C	*R*, *ом*	*t*, °C	*R*, *ом*	*t*, °C	*R*, *ом*
−200	17,28	10	103,96	220	184,48	440	263,29
−190	21,65	20	107,91	230	188,18	450	266,74
−180	25,98	30	111,85	240	191,88	460	270,18
−170	30,29	40	115,78	250	195,56	470	273,60
−160	34,56	50	119,70	260	199,23	480	277,01
−150	38,80	60	123,60	270	202,89	490	280,41
−140	43,02	70	127,49	280	206,53	500	283,80
−130	47,21	80	131,37	290	210,17	510	287,18
−120	51,38	90	135,24	300	213,79	520	290,55
−110	55,52	100	139,10	310	217,40	530	293,91
−100	59,65	110	142,95	320	221,00	540	297,25
−90	63,75	120	146,78	330	224,59	550	300,58
−80	67,84	130	150,60	340	228,17	560	303,90
−70	71,91	140	154,41	350	231,73	570	307,21
−60	75,96	150	158,21	360	235,29	580	310,50
−50	80,00	160	162,00	370	238,83	590	313,79
−40	84,03	170	165,78	380	242,36	600	317,06
−30	88,04	180	169,54	390	245,88	610	320,32
−20	92,04	190	173,29	400	249,38	620	323,57
−10	96,03	200	177,03	410	252,88	630	326,80
0	100,00	210	180,76	420	256,36	640	330,03
				430	259,83	650	333,25

Приложение 6

Градуировочная таблица медных термометров сопротивления, ГОСТ 6651-59, гр. 23

$R_0 = 53{,}00$ *ом*

t, °C	*R*, *ом*	*t*, °C	*R*, *ом*	*t*, °C	*R*, *ом*	*t*, °C	*R*, *ом*
−50	41,71	10	55,26	70	68,81	140	84,61
−40	43,97	20	57,52	80	71,06	150	86,87
−30	46 23	30	59,77	90	73,32	160	89,13
−20	48,48	40	62,03	100	75,58	170	91,38
−10	50,74	50	64,29	110	77,84	180	93,64
0	53,00	60	66,55	120	80,09		
				130	82,35		

Приложение 7

Значение коэффициента ε_λ интенсивности монохроматического излучения (для $\lambda = 0{,}65$ *мк*) физических веществ

Вещество	ε_λ	Вещество	ε_λ
Серебро	0,10	Фарфор	0,37
Медь	0,11	Сталь углеродистая	0,44
Золото	0,15	Шамот	0,75
Платина	0,33	Сталь окисленная	0,80
Нихром	0,35	Уголь	0,85
Никель	0,36		
Чугун	0,37		

Приложение 8

Значения коэффициента ε полного излучения физических веществ

Вещество	t, °C	ε
Серебро	1000	0,035
Никель	1000—1400	0,056—0,069
Медь расплавленная	1100—1300	0,13—0,15
Чугун	1300	0,29
Уголь	1000—1500	0,52
Сталь листовая шлифованная	940—1100	0,55—0,61
Кирпич шамотный	1100	0,75
Окись железа	500—1200	0,85—0,89

Приложение 9

Значения коэффициента производительности C для регулирующих клапанов различных типов

Условный проход $D_у$, *мм*	Коэффициенты производительности C для клапанов типа					
	К, КЯ, КР, КРЯ, ЛК, ЛКР, ЛКЯ, ЛКРЯ	МРК, МРКЯ, МАРКР, МРКРЯ	МРКЧ	25С48нж	ПРК	УКС, УКН
6	—	—	—	—	0,3	0,1; 0,16; 0,25
9	—	—	—	—	0,7	—
15	5	5	8	3,5	—	0,4; 0,64; 1,0
20	8	8	11	6,5	—	—
25	14	14	14	10	—	1,6; 2,5
40	32	32	41	26	—	—
50	50	50	50	40	—	—
70	80	79	79	78	—	—
80	100	100	100	100	—	—
100	210	—	175	160	—	—
125	—	—	—	250	—	—
150	425	—	350	360	—	—
200	—	—	—	570	—	—
250	—	—	—	900	—	—
300	—	—	—	1200	—	—

ОГЛАВЛЕНИЕ

Василий Рудольфович Андерс

КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ГАЗА

Ведущий редактор *А. А Горькова*
Технический редактор *В. В. Воронова*
Корректоры: *М. П. Курылева* и *А. А. Сивакова*

Подписано к набору 28/X 1963 г.
Подписано к печати 8/I 1964 г.
Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Печ. л. 24,5.
Уч.-изд. л. 25,65. Т-01312. Тираж 13 100 экз.
Зак. 1042/553. Цена 1 р. 05 к.
Объявлено в темплане 1963 г. № 1.

Издательство «Н е д р а».
Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 14
«Красный Печатник» «Главполиграфпрома»
Государственного комитета
Совета Министров СССР по печати.
Московский пр., д. 91.





